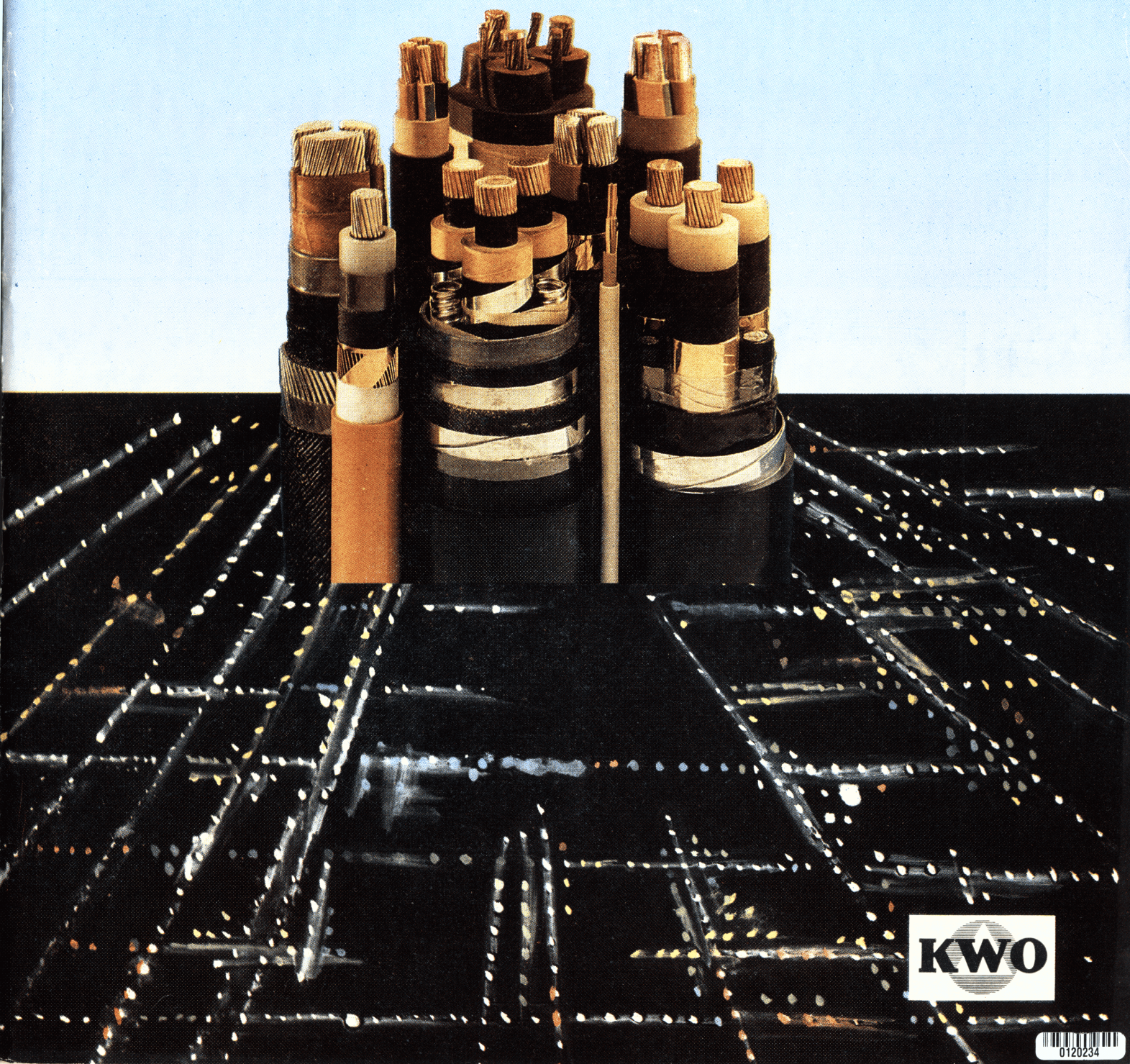
ELEKTRIE 4|90

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN · Postverlagsort für DDR Leipzig · EVP 2,50 Mark · ISSN 0013—5399

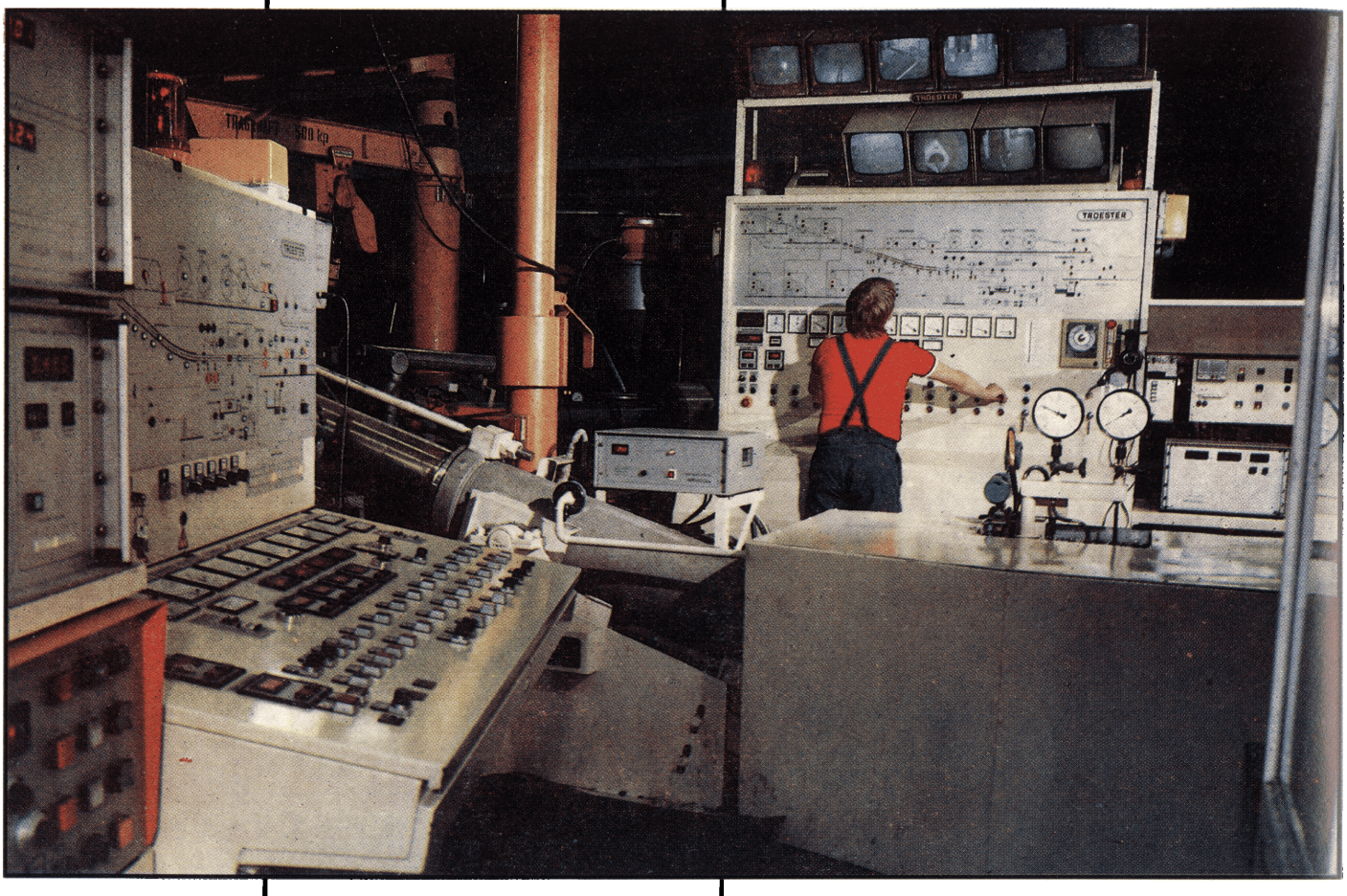
Kabel für jeden Bedarf

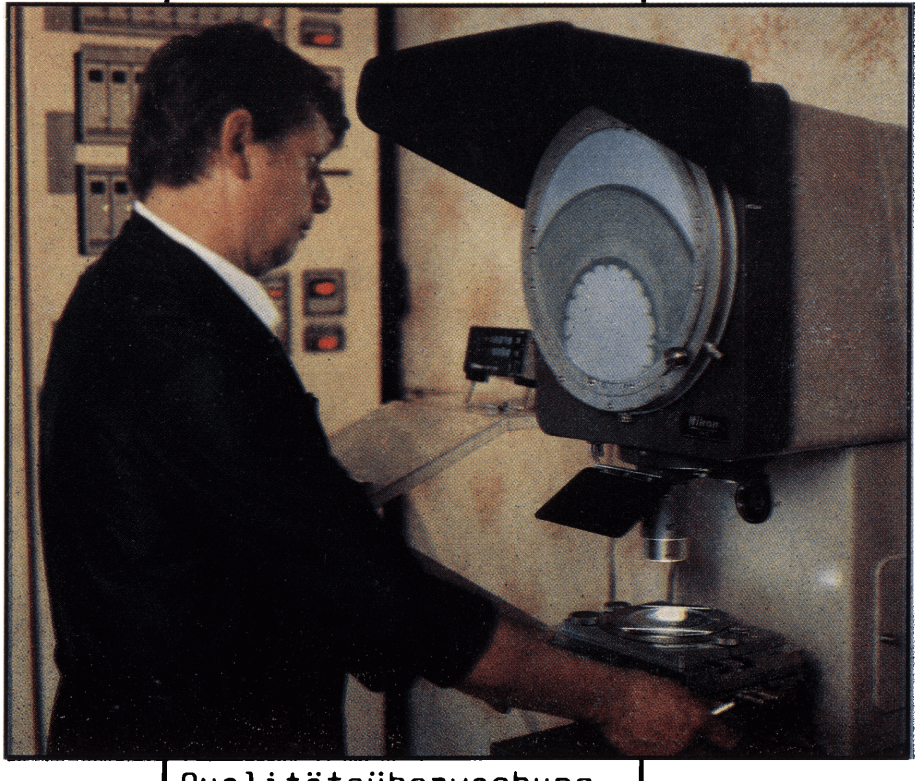


KWO

0120234

Vernetzungsanlage
zur Herstellung
von polyethylenisolierten
Starkstromkabeln





Qualitätsüberwachung
mittels
Profilprojektor

KWO

4|90 ELEKTRIE

44. Jahrgang

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift der Elektrotechnik

ISSN 0013-5399

Organ des Fachverbands Elektrotechnik der Kammer der Technik

Redaktionsbeirat

Vorsitzender:

Prof. Dr. sc. techn. J. Vogel

Mitglieder:

Prof. Dr. sc. techn. S. Altmann · Prof. Dr. sc. techn. H. Böhme · Prof. Dr. sc. techn. Dr. h. c. P.-K. Budig · Dr. sc. techn. G. Burkhard · Dr.-Ing. D. Flügge · Obering. K. Friedel · Prof. Dr. sc. techn. J. Hoffmann · Dipl.-Ing. H. Kabisch · Prof. Dr.-Ing. habil., Dr. e. h. R. Lappe · Dr. rer. nat. K. Möbius · Prof. Dr. sc. techn. E. Muschick · Prof. Dr. sc. techn. V. Pfeiler · Prof. Dr.-Ing. e. h. K. Pommer · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Schönfeld · Obering. Dipl.-Ing. N. Wass · Prof. Dr.-Ing. habil. G. Wunsch

Korrespondenten:

Dr.-Ing. K. Hannella, Ilmenau · Dr.-Ing. W. Jordan, Dresden

Titelbild

Mit der Herstellung einer breiten Erzeugnispalette, in die verstärkt moderne Kabelkonstruktionen und Isolierstoffe Eingang finden, trägt die Kabelindustrie dazu bei, Elektroenergieverluste zu senken und eine rationelle Übertragung und Verteilung zu gewährleisten. Für die Durchsetzung dieser Zielstellung werden umfangreiche materielle und finanzielle Mittel in Forschung und Entwicklung aufgewendet.
Unser Bild zeigt die Erzeugnispalette des Kombinates VEB Kabelwerk Oberspree „Wilhelm Pieck".

VERLAG TECHNIK BERLIN

Inhalt

Seite

Aktuelle Information 122

Adolph, A.
Kooperation in Forschung und Produktion erweitern 123

Fachaufsätze

Lemke, E.; Weißenberg, W.; Hornschuh, M.; Flügge, D.; Krieger, D.; Friese, G.; Siebert, K.
Neues Diagnoseverfahren zur dielektrischen Vor-Ort-Prüfung von PE/VPE-Mittelspannungskabeln 124

Flügge, D.; Röhr, L.
Multistreßbeanspruchung bei Kabeln unter Einfluß energiereicher Strahlung 126

Eberhardt, M.; Li, C. S.
Elektrische Lebensdauer von Polyethylen-Kabelisolierungen bei Betriebstemperatur 131

Scharff, C.; Eberhardt, M.
Verhalten von Vernetzerspaltprodukten in VPE-Kabelisolierungen bei Betriebstemperatur 133

Scharff, C.; Eberhardt, M.
Wirkung zyklisch-thermischer Belastung über 130 °C auf die VPE-Kabelisolierung 134

Hornschuh, M.; Lemke, E.
Anwendung der TE-Sondenmeßtechnik im Rahmen der Qualitätskontrolle an PE/VPE-Mittelspannungskabeln 135

Jegust, D.
Berechnung der elektrischen Feldstärke in Kabelverbindungsmuffen und Kabelverschlüssen mittels PC 139

Mosch, W.; Dietrich, M.
Hochspannungstechnische Gesichtspunkte bei der Anwendung schwachinhomogener elektrischer Felder 141

Kahle, M.; Porzel, R.; Knüpfer, B.; Neudert, E.
Grundlagen für alternative Hochspannungsprüftechniken für Kabel mit extrudierter Kunststoffisolierung 146

Laage, U.; Röhr, L.
Watertreeing bei PE/VPE-Mittelspannungskabeln 151

Heidmann, G.
Neue Hochtemperatur-Supraleiter können für die Starkstromtechnik interessant werden 154

Umschau

Fachtagungen 155

Kurzberichte 156

Patente 157

Dissertationen 157

Rezensionen 157

AKTUELLE INFORMATION

INSUCON 1990

Electrical Insulation Systems for Rotating Machines
6th BEAMA International Electrical Insulation Conference

Zeit: 21. bis 24. Mai 1990
Ort: Brighton (United Kingdom)
Veranstalter: BEAMA, the Federation of British Electrotechnical and Allied Manufacturers' Associations, on behalf of the Electrical and Electronic Insulation Association (EEIA — federated in BEAMA), and in association with ERA Technology Limited

Two of the ten sessions at the BEAMA Insulation Conference will be devoted to Insulation Systems for Motors over a wide range of power and operating voltages. A further session will deal exclusively with diagnostic measurements designed to analyse performance and condition of machines in services.
Three different insulation systems for overhangs of H.V. coils have been evaluated using realistic, large models. Film-faced materials have been investigated which give significantly improved results and suggestions made to overcome some of the problems which can arise in the use of these materials.
Resin-rich systems, originally developed for specific purposes, have now become a standard technology for one company for all machines operating above 11 kV. A testing format has been developed to give utilities assurance of reliability without the need for protracted field experience.

Topics
— Expert Systems
— Traction Motors
— New Resin Technologies

Anfragen
The Publicity Department
BEAMA Insulation Conference
8 Leicester Street
London WC2H 7BN
Telephone 01-437 0678
Telex 263536
Telefax 01-437 4901
Die Redaktion EK 4172

3D — CAD — System

Fachtagung

Zeit: 16. Mai 1990
Ort: Leipzig, Leipzig-Information
Veranstalter: Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik

Inhaltliche Schwerpunkte
— Produktivitätssteigerung durch CAD-software
— EUCLID — ein integriertes 3D-Volumensystem mit einheitlicher kohärenter Datenbasis
— Vorstellung, Demonstration, Beratung

Anfragen
Kammer der Technik
Tel.: 2265305
Tel.: 2265218
Die Redaktion EK 4203

Kolloquium der Zeitschrift „Elektrizitätswirtschaft" Kooperation DDR-Bundesrepublik Deutschland

Zeit: 11. Juni 1990
Ort: Commerzbank AG, Hauptverwaltung
Neue Mainzer Straße 32
6000 Frankfurt am Main 1
Veranstalter: Zeitschrift „Elektrizitätswirtschaft" in Zusammenarbeit mit der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke, Frankfurt am Main

Inhaltliche Schwerpunkte
— Stand und zukünftige Entwicklung der Stromversorgung in der DDR
— Kooperationsmöglichkeiten zwischen der Stromversorgung der DDR und der Bundesrepublik
— Erste Erfahrungen mit Kooperationen aus der Sicht der verschiedenen Stufen der Versorgungswirtschaft (Verbund-, Regional- bzw. Territorial-, Lokalunternehmen)
— Finanzierungsfragen

Anfragen
Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke m. b. H. — VWEW
Stresemannallee 30
6000 Frankfurt am Main 70
Die Redaktion EK 4202

The Fourth International Conference on Electric Fuses and their Applications, ICEFA 91

Zeit: 23. bis 25. September 1991
Ort: Nottingham (United Kingdom)
Veranstalter: Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Nottingham

Die alle vier Jahre stattfindenden ICEFA-Konferenzen bieten den führenden Fachleuten sowie den Anwendern ein internationales Forum für die Diskussion neuester Entwicklungen und für die Erschließung neuer Anwendungsfälle.
Das Programm der ICEFA 91 beinhaltet zum einen die Diskussion von Themen, die für Hersteller und Anwender von Hochspannungs-, Niederspannungs- und Geräteschutzsicherungen von allgemeinem Interesse sind. Zum anderen wird über neueste Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur weiteren Verbesserung und Leistungssteigerung von Sicherungen berichtet. Die Konferenz bietet somit eine ausgezeichnete Gelegenheit, die Kenntnisse über Sicherungen auf den neuesten Stand zu bringen.

Inhaltliche Schwerpunkte
- Anwendungen
  — Anwenderprobleme beim Schutz
  — Koordination mit Stromkreisen
  — Sicherung und andere Schaltgeräte
  — Halbleiterumrichter
  — Energietechnik: Motoren, Transformatoren, Kondensatorbatterien
  — Elektronische Systeme einschließlich Telekommunikation und Büromaschinen
- Neue Entwicklungen
  — Neue Arten von Sicherungen
  — Trends bei Sicherungen
  — Künftige Schutzkonzepte bei Hochspannung einschließlich Ganzbereichssicherungen
  — Kleinstsicherungen für gedruckte Schaltungen (PCB,- SMD- und UMF-Technologien)
- Konstruktion, Prüfverfahren und Normen
  — CAD-gestützte Entwicklung, Konstruktion und Fertigung
  — Werkstoffe und Herstellungsverfahren
  — Qualitätssicherung und Zuverlässigkeit
  — Zusammenhang zwischen 3-phasigen und 1-phasigen Prüfkreisen
  — Entwicklung von Normen einschließlich Zeit-Strom-Charakteristik
- Physik der Sicherungen
  — Vorgänge in Sicherungen: Schmelzvorgang, Lichtbogenentstehung, Lichtbogenverhalten
  — Erwärmungsvorgänge: Stationäres Verhalten, transientes Verhalten, zyklische Belastung, Vorgänge beim Einschalten

Vortragsanmeldungen zu den genannten Themenkreisen werden in Form einer kurzen Übersicht (maximal eine DIN-A-4-Seite) bis zum 1. Juni 1990 an den Leiter des Organisationskomitees erbeten. Die Kurzfassung sollte die wesentlichen Gesichtspunkte des Vortrages beinhalten. Die Autoren der angenommenen Beiträge werden im Juli 1990 benachrichtigt. Termin für die Abgabe des vollständigen maschinengeschriebenen Manuskriptes (maximal 6 Seiten zweispaltig DIN A 3, etwa 4800 Worte, einschließlich der Bilder) ist der 21. Januar 1991.

Anfragen
Dr. *A. F. Howe*
ICEFA 91 Organising Committee Chairman
Department of Electrical and Electronic Engineering
University of Nottingham
University Park
Nottingham
NG7 2RD
United Kingdom
Die Redaktion EK 4171

Kooperation in Forschung und Produktion erweitern

Von

Alfred Adolph

Generaldirektor
Kombinat VEB Kabelwerk Oberspree (KWO) „Wilhelm Pieck"

Es ist unumstritten, daß die Kabelindustrie mit ihren Erzeugnissen einen wesentlichen Beitrag für eine effektivere Energieökonomie leistet. Mit der Herstellung einer breiten Erzeugnispalette, in die verstärkt moderne Kabelkonstruktionen und Isolierstoffe Eingang finden, trägt sie dazu bei, Elektroenergieverluste zu senken und eine rationelle Übertragung und Verteilung zu gewährleisten!

Für die Durchsetzung dieser Zielstellung werden umfangreiche materielle und finanzielle Mittel in Forschung und Entwicklung aufgewendet. Sie werden schwerpunktmäßig für die Schaffung wissenschaftlich-technischer Grundlagen bzw. gezielte Erzeugnisentwicklungen vorwiegend auf den Gebieten der Lichtwellenleiterübertragungstechnik bzw. des Einsatzes moderner Ummantelungsmaterialien eingesetzt. Bei letzteren stehen vernetzte Kabelisolierungen im Vordergrund.

In enger Zusammenarbeit mit den Werkstofflieferanten, insbesondere mit der chemischen Industrie und dem Kabelmaschinenbau gilt es, die Werkstoffeigenschaften einer Reihe bereits bekannter Grundstoffe für den Einsatz in der Kabelindustrie nutzbar zu machen und neue Verarbeitungsmöglichkeiten zu schaffen.

Dabei gehen wir davon aus, daß diese Werkstoffe für die Verarbeitung in automatisierten Anlagen geeignet sein müssen. Die Verarbeitungsmöglichkeiten der Kabelwerkstoffe, die konstruktive Gestaltung der Kabel und Leitungen und die anzuwendenden technologischen Herstellungs- und Prüfverfahren betrachten wir dabei stets als Einheit.

Mit Hilfe eines integrierten Systems der automatisierten Informationsverarbeitung werden diese Komplexe immer stärker miteinander vernetzt.

Perspektivisch gesehen wird der Prozeß der Substitution der klassischen Werkstoffe der Kabeltechnik fortgeführt. Moderne Materialien, wie vernetzte und verschäumte Polyolefine, synthetische Elaste, Glas, Polyamide finden zunehmend Eingang in alle Fertigungsbereiche.

Ziel aller Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist es, solche Erzeugnisse zu entwickeln und in Produktion zu nehmen, die dem Anwender eine Reihe von Vorteilen bieten. Hierzu gehören z.B. hohe Lebensdauer und Zuverlässigkeit, erhöhte Strombelastbarkeit, geringere Übertragungsverluste, verringerte Dämpfung, reduzierte Abmessungen und geringere Masse, erhöhte Flexibilität, Wartungs- und Montageerleichterungen, vereinfachte Lagerhaltung.

Der Markt von morgen erwartet von uns Qualitätserzeugnisse, die bezogen auf Leistungsniveau, Zuverlässigkeit und Ökonomie einen konkurrenzfähigen Platz einnehmen. Es gilt darum, klug die Möglichkeiten zu nutzen, die sich aus der Zusammenarbeit mit Universitäten und anderen wissenschaftlichen Einrichtungen ergeben. Insbesondere auf dem Gebiet der Entwicklung und des Einsatzes von Isolierstoffen gibt es bewährte Traditionen. Fast 2 Jahrzehnte währt bereits die Zusammenarbeit mit dem Zentralinstitut für Festkörperphysik und Werkstofforschung der Akademie der Wissenschaften auf dem Gebiet der Vernetzung von Kabelisolierwerkstoffen. Besonders hervorzuheben sind hier die Werkstoffentwicklungen für strahlenvernetzte Kabel und dementsprechende Vernetzungsverfahren.

Eine langjährige Forschungskooperation besteht auch mit der TU Dresden, Wissenschaftsbereich Hochspannungstechnik, auf dem Gebiet der elektrischen Festigkeit und Lebensdauer von Polyethylenisolierungen und der Vor-Ort-Prüfung von plastisolierten Mittelspannungs- und Hochspannungskabeln.

Neben den inländischen Forschungseinrichtungen, zu denen u.a. auch die Technischen Hochschulen Ilmenau und Zittau gehören, gibt es eine jahrzehntelange Zusammenarbeit mit wissenschaftlichen Forschungsinstituten des Auslandes. Jüngstes Beispiel ist die Produktionsaufnahme von strahlenvernetzten Niederspannungskabeln und Schiffskabeln auf einer großtechnischen Versuchsanlage, deren Kernstück ein Elektronenbeschleuniger aus der UdSSR bildet. Gemeinsam mit dem Hersteller, dem Leningrader Jefremow-Forschungsinstitut für elektrophysikalischen Apparatebau sowie mit dem bereits genannten Zentralinstitut der Akademie der Wissenschaften und Wissenschaftlern und Technologen unseres Kombinates wurde eine optimale technologische Lösung für die 1-kV-VPE-Kabelherstellung geschaffen. Damit gelang es dem Kombinat, eine neue Generation von Schiffskabeln entsprechend den IEC-Empfehlungen in Produktion zu nehmen und die PVC-isolierten Schiffskabel abzulösen.

Approbationen der wichtigsten Schiffsklassifikationsgesellschaften liegen vor.

In der Erweiterung und Vertiefung der internationalen Kooperation einschließlich Joint-Ventures sehen wir Arbeitsrichtungen, um know how und Kapital für die Entwicklung unseres Industriezweiges nutzbar zu machen. Ziel ist, durch gemeinsame Produktion und den Absatz hochwertiger Erzeugnisse im Export und auf dem Binnenmarkt die notwendigen Erlöse für den Ausbau der Forschung und die weitere Modernisierung des Produktionsapparates zu erwirtschaften.

Moderne Fertigungstechnologien und ein umfassendes System fertigungsbegleitender Qualitätssicherung ermöglichen uns schon heute, das an der ISO 9000—9004 orientierte Qualitätssicherungssystem umfassend durchzusetzen.

Kernstück ist dabei die durchgängige Qualitätsdokumentation, die eine moderne Meß- und Prüftechnik vom Wareneingang über die Zwischenprüfungen bis zur Endkontrolle voraussetzt.

EK 4136

Neues Diagnoseverfahren zur dielektrischen Vor-Ort-Prüfung von PE/VPE-Mittelspannungskabeln

E. Lemke, KDT, Dresden; W. Weißenberg, KDT; M. Hornschuh, KDT; D. Flügge, KDT, Berlin; D. Krieger, KDT; G. Friese, KDT, Dresden; K. Siebert, KDT, Rostock

Mitteilung der Arbeitsgruppe „TE-Meßtechnik" des KDT FUA 0.4 „Hochspannungs-Prüf- und -Meßtechnik"

Die Gewährleistung einer hohen Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Starkstromkabelnetzen auf der Basis hochpolymerer PE/VPE-Isolierungen erfordert nach der Endprüfung beim Hersteller zusätzliche dielektrische Hochspannungsprüfungen bei der Inbetriebnahme sowie nach längerer Betriebsdauer. Die für Masse-/Ölpapierkabel übliche Durchschlagprüfung mit hoher Gleichspannung hat sich für PE/VPE-Kabel nicht bewährt, da mögliche Raumladungsakkumulationen zu lokalen Feldstärkeüberhöhungen und damit zur Zündung von Teilentladungen (TE) führen können [1]. Um derartige Vorbeschädigungen zu vermeiden, wird weltweit nach Alternativ-Prüfverfahren gesucht, wobei die Bereitstellung der kapazitiven Ladeleistung bei zeitlich veränderlicher Prüfspannung das Hauptproblem darstellt [2].

1. Alternativ-Prüfverfahren

Aufgrund der Unzulänglichkeit der Gleichspannungsprüfung werden in letzter Zeit dielektrische Prüfverfahren auf der Basis von VLF (very low frequency)-Spannungen mit typischen Frequenzen um 0,1 Hz diskutiert [3]. Da der Ladestrom der Frequenz umgekehrt proportional ist, verringert sich somit der Leistungsbedarf gegenüber der 50-Hz-Prüfspannung um einen Faktor von etwa 500. Andererseits wird vermutet, daß durch den innerhalb von 10 Sekunden erfolgenden Polaritätswechsel gefährliche Raumladungsakkumulationen und damit Vorbeschädigungen vermieden werden können. Praktische Erfahrungen zeigen jedoch, daß bei derartigen Tiefstfrequenzspannungen im Vergleich zur betriebsfrequenten 50-Hz-Wechselspannung wesentlich andere Mechanismen bei der Zündung und dem Vorwachsen von TE-Kanälen wirksam sind [4]. So erscheinen VLF-Durchschlagprüfungen für PE/VPE-Kabel umstritten.

Aus physikalischer Sicht wären Prüfspannungsformen zu empfehlen, die auch unter realen Betriebsbelastungen eine Zündung von TE-Kanälen bewirken können. Da sämtliche PE-VPE-Kabel beim Hersteller einer Stückprüfung unterzogen werden, bei der neben dem Nachweis der Spannungsfestigkeit (Prüfspannung: 2,5faches der Leiter-Erde-Spannung, Dauer: 5 Minuten) auch ein TE-Pegel von weniger als 5 pC (Prüfspannung: 2,0faches der Leiter-Erde-Spannung, Dauer: 1 Minute) garantiert wird [5], ist eine Entstehung von TE-Kanälen im praktischen Betrieb durch dauernde Einwirkung der betriebsfrequenten Wechselspannung wenig wahrscheinlich. Dagegen dürfte eine Zündung von TE vor allem auf transiente Schaltüberspannungen zurückzuführen sein. Falls diese nach dem Abklingen solcher Überspannungen bei Betriebsspannung nicht wieder verlöschen, kann es zu einer ständigen TE-Degration und damit schließlich zum Durchschlag kommen. Deshalb ist es naheliegend, dielektrische Prüfungen an verlegten PE/VPE-Kabeln mit nachgebildeten Schaltspannungen durchzuführen, die für transiente Überspannungen repräsentativ sind. Weiterhin erscheint eine Detektion möglicher TE-Fehlerstellen durch eine empfindliche TE-Messung sinnvoll, die bei der Schaltspannungsprüfung erfolgen müßte [6]. Bekanntlich ist die TE-Einsatzspannung störstellenbehafteter Isolierungen erheblich niedriger als die Durchschlagspannung. Aus diesem Grund bietet diese Testmethode gegenüber den bisher üblichen zerstörenden Verfahren neben dem Vorteil eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens zusätzlich die Möglichkeit der Verringerung der Prüfspannungspegel, weil anstelle des Kriteriums „Durchschlag" das Kriterium „Teilentladung" tritt.

2. TE-Messung bei Schaltimpulsspannung

Eine Realisierung von TE-Messungen unter Vor-Ort-Bedingungen bei Schaltimpulsspannung erfordert neben der Beherrschung des i. allg. sehr hohen Grundstörpegels der Umgebung die Unterdrükkung von Störkomponenten, die einerseits durch den Zündfunken der Schaltspannungs-Prüfanlage und andererseits durch den kapazitiven Ladestrom des Koppelkondensators verursacht werden.

Diese bisher als kaum beherrschbar angesehenen Probleme konnten durch konsequente Anwendung einer breitbandigen Erfassung und Verarbeitung von TE-Signalen gelöst werden [6]. Eine breitbandige TE-Messung bietet im Vergleich zu den bisher weit verbreiteten schmalbandigen Meßverfahren neben dem Vorteil eines günstigeren Nutz-Störsignal-Verhältnisses [7] zusätzliche Möglichkeiten der Störsignalreduzierung durch einen gesteuerten Meßablauf [8]. So konnte durch Modifizierung des breitbandigen TE-Meßgerätes vom Typ MTE-3 [9] sowie der TE-Sonde vom Typ 4202 [10] bei Schaltimpulsspannung eine TE-Nachweisgrenze von weniger als 10 pC erreicht werden [6], obwohl bei der Triggerung der Schaltspannungs-Prüfanlage Störimpulse von weit über 100000 pC in den TE-Meßkreis einkoppeln.

Entscheidend für eine praktische Akzeptanz des empfohlenen Prüfverfahrens ist neben der Beherrschung der Störproblematik eine Prozedur, welche bei Schaltspannungsbelastung eine sichere Detektion von TE garantiert, wenn diese auch bei 50-Hz-Wechselspannung nachweisbar sind. Dazu erfolgten umfangreiche Grundlagenstudien an Kabelprüflingen, in die beim Herstellungsprozeß künstliche und damit genau bekannte TE-Fehlerstellen implementiert wurden [11]. Die Ergebnisse systematischer Grundlagenuntersuchungen zeigen, daß bei 50-Hz-Wechselspannung festgestellte TE auch bei Schaltspannung mit hoher Wahrscheinlichkeit nachweisbar sind (Bild 1), wenn die Schaltspannungsamplitude etwa dem 2fachen Effektivwert der Leiter-Erde-Spannung des PE/VPE-Kabels entspricht (Bild 2) und die Stirnzeit einige 100 µs überschreitet. Untersuchungen zum Einfluß der Impulsform ergaben ferner optimale Zündbedingungen bei Stirnzeiten zwischen 1 und 5 ms, wobei die TE-Zündung immer im Stirnbereich erfolgte. Bei aperiodischen Impulsspannungen wurde ein Einfluß des Impulsrückens nicht festgestellt. Daher werden Empfehlungen zur Rückenzeit nur durch schaltungstechnische Gesichtspunkte bei der Dimensionierung der Prüfanlage bestimmt. Im Hinblick auf einen guten Ausnutzungsgrad bei vertretbarem Aufwand ist ein Verhältnis der Stirn- zur Rückenzeit von etwa 1:10 zweckmäßig.

3. Praktische Erfahrungen

Neben umfangreichen Grundlagenstudien zur TE-Zündung in PE/VPE-Kabelisolierungen (Wechsel- und Schaltspannungsbelastung) erfolgten erste orientierte TE-Messungen bei Schaltspannungen an verlegten Kabeln. Dazu wurde ein spezieller Kabelmeßwagen konzipiert, der folgendermaßen ausgerüstet ist (Bild 3):

1. Stationäre Komponenten
   - — Gleichspannungserzeuger
   - — TE-Meßgerät
   - — Fehlerortungsgerät
   - — Digitaloszilloskop
   - — Spannungs-Meßgerät
2. Transportable Komponenten
   - — Stoßkondensatoren
   - — Stirn- und Rückenwiderstände
   - — Spezial-Triggerfunkenstrecke
   - — TE-Koppelkondensator
   - — TE-Sonde
   - — Zubehör.

Die bisherige Ausstattung des Kabelmeßwagens erlaubt dielektrische Hochspannungsprüfungen an Kabelanlagen mit einer Isolationsspannung bis 36 kV bei maximaler Kabellänge von 2 km.

Prof. Dr. sc. techn. *Eberhard Lemke*, Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden; Dr.-Ing. *Werner Weißenberg*, Dipl.-Ing. *Michael Hornschuh*, VEB Kabelwerk Meißen im Kombinat KWO Berlin; Dr.-Ing. *Dieter Flügge*, Kombinat VEB Kabelwerk Oberspree (KWO) „Wilhelm Pieck"; Dr.-Ing. *Dietmar Krieger*, Dipl.-Ing. *Gerd Friese*, Kombinat VEB Robotron/Meßelektronik Dresden; Ing. *Klaus Siebert*, VEB Energiekombinat Rostock

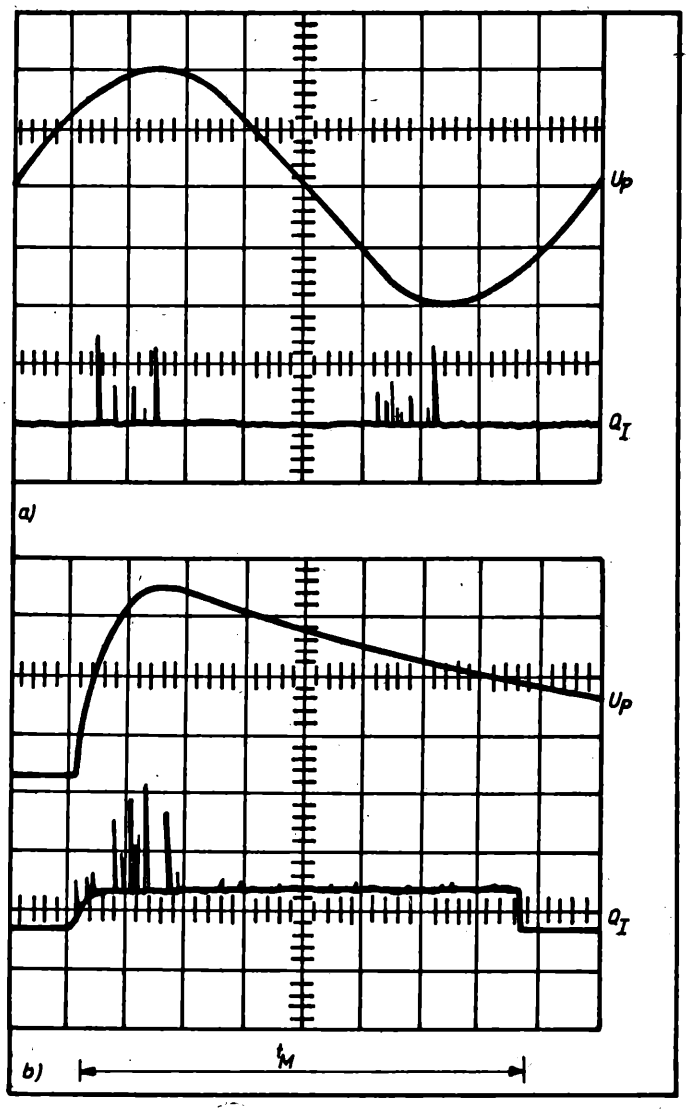
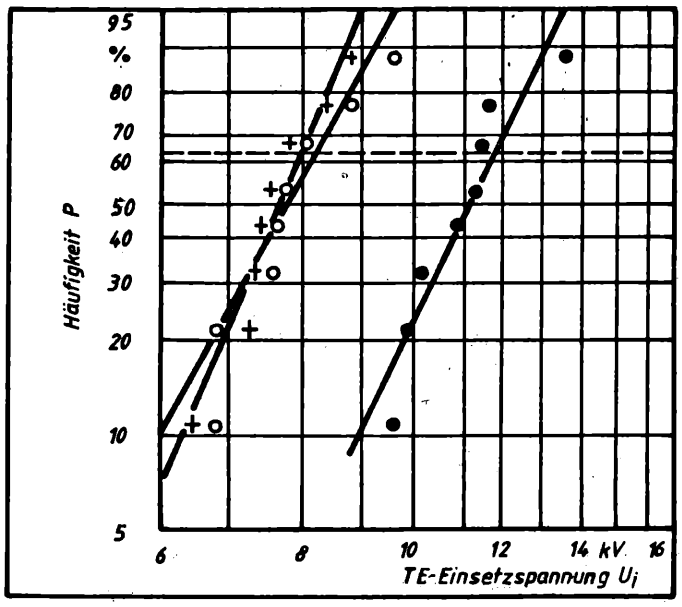


Bild 1. TE-Verhalten eines VPE-Kabelprüflings mit künstlicher Fehlstelle
a) bei Wechselspannung (50 Hz); b) bei Schaltimpulsspannung (1000/10 000 µs)
U_p Prüfspannung (5 kV/RE); Q_I TE-Impulse (10 pC/RE); t_M Meßintervall (7 ms)

Bild 2. Statistische Verteilung der TE-Einsetzspannungen von 10 untersuchten VPE-Kabelprüflingen U_0/U_n = 6/10 kV
+ Wechselspannung, Mittelwerte von 20 Spannungssteigerungsversuchen für jeden Prüfling (Effektivwerte);
o Schaltspannung, Mittelwerte von 20 Prüfimpulsen für jeden Prüfling (Scheitelwerte), TE-Einsetzwahrscheinlichkeit 2 %
• Schaltspannung, Mittelwerte von 20 Prüfimpulsen für jeden Prüfling (Scheitelwerte), TE-Einsetzwahrscheinlichkeit 95 %



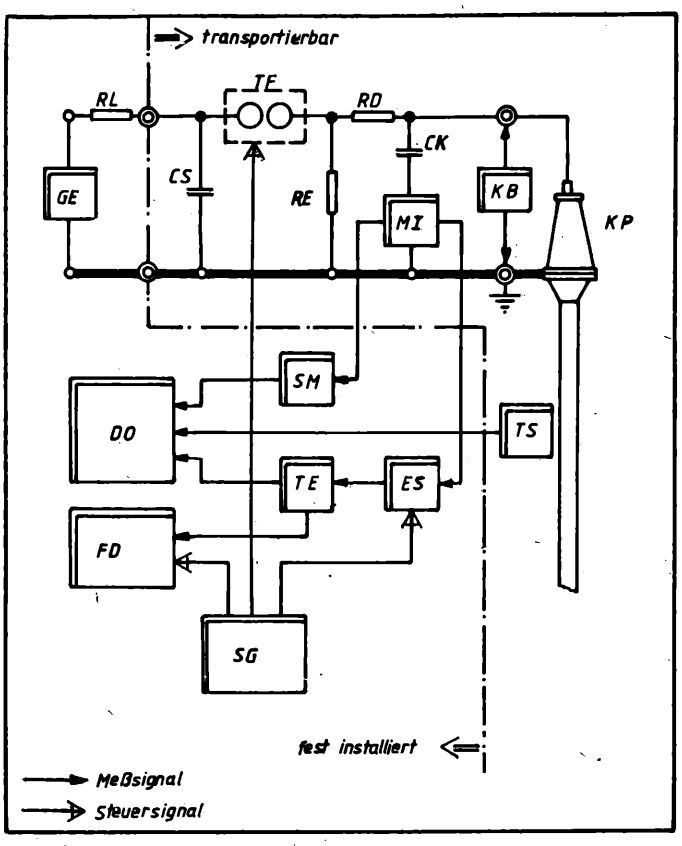


Bild 3. Prüf- und Meßeinrichtung für TE-Messungen an Kabelnetzen bei Schaltspannung
GE Gleichspannungserzeuger; *RL* Ladewiderstand; *TF* Triggerfunkenstrecke; *RD* Dämpfungswiderstand; *RE* Entladewiderstand; *CS* Stoßkondensator; *CK* Koppelkondensator; *MI* Meßimpedanz; *KB* Kalibrator; *KP* Kabelprüfling; *TS* TE-Sonde; *SM* Spannungsmeßeinrichtung; *DO* Digitaloszilloskop; *ES* Elektrischer Schalter; *TE* TE-Meßgerät; *FO* Fehlerortungsgerät; *SG* Steuergerät

Mit dem Gleichspannungserzeuger kann die maximale Prüfspannung von 70 kV erzeugt werden. Vier Stoßkondensatoren mit einer Kapazität von jeweils 6 µF und einer zulässigen Ladespannung von 40 kV ermöglichen durch Kombination in Reihen-/Parallelschaltung optimale Prüfparameter. Zur TE-Messung dienen Modifikationen des TE-Meßgerätes MTE-3 (Hersteller TuR Dresden) und der TE-Sonde M 4202 (Robotron/Meßelektronik Dresden). Das Fehlerortungsgerät M 4005 (Robotron/Meßelektronik Dresden) wurde den obengenannten TE-Detektoren über entsprechende Schnittstellen angepaßt.

Der Zeitaufwand zum Aufbau der Meß- und Prüfeinrichtung vor Ort beträgt für 2 Techniker nicht mehr als eine Stunde. Auf der Grundlage bisheriger Meßerfahrungen, die aus vor 5 Jahren begonnenen Grundlagenuntersuchungen sowie aus diagnostischen Prüfungen in den letzten 2 Jahren vor Ort erzielt wurden, erwiesen sich folgende vorläufige Parameter und Prozeduren für die Inbetriebnahmeprüfung neuer Kabelstrecken als zweckmäßig:

1. Impulsamplitude der Prüfspannung
   $U_p = 1{,}5 \cdot \sqrt{2} \cdot U_0 \cong 2 \cdot U_0$
   U_0 Effektivwert der Leiter-Erde-Spannung des Kabelnetzes.
2. Impulsform der Spannung
   Stirnzeit: 1 ··· 5 ms
   Rückenzeit: 10 ··· 50 ms
   Aperiodischer Verlauf bei einem Durchschwingen kleiner als 30 %.
3. Zahl der Prüfstöße
   $N = 10$ (beliebige Polarität bei einem Zeitabstand von etwa 10 Sekunden).
   Falls im Zusammenhang mit der Fehlerortung mehr als 10 Prüfstöße erforderlich sind, muß ein alternierender Polaritätswechsel nach jeweils 10 aufeinanderfolgenden unipolaren Prüfstößen erfolgen.
4. TE-Impulsladung
   $Q_I = 50$ pC
   Bei geringem Umgebungsstörpegel wird die TE-Nachweisgrenze durch die Schaltspannungs-Prüfanlage bestimmt; sie beträgt

weniger als 10 pC. Durch oszillografische Signaldarstellung kann auch bei einem Umgebungsstörpegel von 20—30 pC der obengenannte Wert von 50 pC i. allg. noch deutlich nachgewiesen werden.

Zur weiteren Vervollkommnung der Prozedur werden die Prüfungen an längere Zeit im Betrieb befindlichen Kabelanlagen bei einer Spannungsamplitude von $1{,}5 \cdot U_0$ begonnen. Nach jeweils 10 Prüfimpulsen erfolgt eine Spannungssteigerung um $0{,}5 \cdot U_0$, wobei die Polarität geändert wird. Die Prüfung ist beendet, wenn bei $2{,}5 \cdot U_0$ keine TE detektierbar sind.
Ergibt die obengenannte Prüfprozedur TE mit einer Impulsladung von über 50 pC, so schließt sich eine Fehlerlokalisierung an. Werden Endverschlüsse oder Muffen als Fehlerursache erkannt, erfolgt Weiterbetrieb der Anlagen. Dabei wird im Rahmen zyklischer Untersuchungen innerhalb von jeweils 6 Monaten die Trendentwicklung verfolgt, um ggf. die Fehlerbeseitigung rechtzeitig einleiten zu können. Wird dagegen eine Fehlerstelle in der PE/VPE-Isolierung identifiziert, erfolgen sofortige Reparaturmaßnahmen.
Wie bereits angeführt, resultieren die obengenannten Parameter und Prozeduren aus vorläufigen Prüfverfahren. Die Untersuchungen werden im Rahmen von Grundlagenstudien und praktischen Erprobungen vor Ort weitergeführt, so daß in Zukunft noch eine weitere Präzisierung der Prüfmethode zu erwarten ist.

4. Zusammenfassung

Als Alternative zur früher üblichen Durchschlagprüfung bei Gleichspannung wird ein neuartiges zerstörungsfreies Prüfverfahren für verlegte PE/VPE-Mittelspannungskabel empfohlen. Es basiert auf einer TE-Messung bei Schaltspannung. Durch Anwendung von Prinzipien der breitbandigen TE-Messung bei gesteuertem Meßablauf konnte die Störproblematik in befriedigender Weise gelöst werden. Basierend auf Ergebnissen der Grundlagenforschung sowie experimentellen Erprobungen vor Ort, wurden vorläufige Parameter und Prozeduren für diagnostische TE-Messungen bei Schaltspannungen an PE/VPE-Kabeln abgeleitet. Die Arbeiten werden im Hinblick auf eine universelle Anwendbarkeit der Prüfmethode zielstrebig fortgeführt.

Literatur

[1] *Ieda, M.; Nawata, M.:* DC treeing breakdown associated with space charge formation in polyethylene. IEEE Trans. on Electrical Insulation EI-12 (1977), S. 19—25
[2] *Auclair, H.; Boone, W.: Papadopulus, M. S.:* Development of a new offer laying test method for high voltage power cable systems. CIGRE-Session, Paris (1988), paper 21—06
[3] *Grönefeld, P.:* Elektrische Prüfung von Polymeren mit verschiedenen Spannungsformen. Dissertation. Technische Universität Hannover 1986
[4] *Grönefeld, P.; von Olshausen, R.:* Tree inception and propagation in polyethylene at 0.1 Hz and 50 Hz AC voltages. 5th ISH, Braunschweig (1987), paper 21.10
[5] VDE 0273 Kabel mit Isolierung aus vernetztem Polyethylen. Ausg. 1986
[6] *Lemke, E.; Röding, R.; Weißenberg, W.:* On-site testing of extruded power cables by PD measurement at SI voltages. CIGRE Symposium, Wien (1987), paper 1020-02
[7] *Lemke, E.:* A new procedure for PD measurement on polyethylene insulated power cables. 3rd ISH, Mailand (1979), paper 41.02
[8] *Lemke, E.:* A new partial discharge measuring procedure based on the evaluation of the cumulative charge. Conf. on PD in Electrical Insulation, Bangalore/Indien (1976), paper I.1
[9] *Hauschild, W.; Küttner, H.; Thümmler, K.:* Systeme zur breitbandigen Messung von Teilentladungen in Hochspannungsisolierungen. ELEKTRIE, Berlin 35 (1981) 7, S. 353—357
[10] *Lemke, E.:* A new procedure for partial discharge measurements on the basis of an electromagnetical sensor. 5th ISH, Braunschweig (1987), paper 41.02
[11] *Weißenberg, W.:* Einfluß makroskopischer Fehlstellen auf die elektrische Alterung von Polyethylenkabeln bei Wechselspannungsbelastung. Dissertation A. Technische Universität Dresden 1987

EA 6121

Multistreßbeanspruchung bei Kabeln unter dem Einfluß energiereicher Strahlung

D. Flügge, KDT; L. Röhr, KDT; Berlin

Die Erzeugnisse der DDR-Kabelindustrie werden seit Jahrzehnten weltweit in allen Klimazonen und unter den verschiedensten Beanspruchungen eingesetzt. Daraus resultierend liegen langjährige Erfahrungen nicht nur im Verhalten unter Normalbedingungen, sondern auch bei den unterschiedlichsten Umgebungseinflüssen vor, ohne daß bisher der Begriff Multistreßbeanspruchung üblich war. Als wichtigste Einzelbeanspruchungen, deren Auswirkungen sämtlich zeitabhängig sind ,gelten:

— elektromagnetische Felder
— Temperaturfelder
— mechanische Beanspruchungen
— Strahlung (u. a. energiereiche Strahlung der Kerntechnik)
— chemische Beanspruchungen
— biologische Einflüsse.

Im allgemeinen treten in der Praxis mehrere dieser Einzelbeanspruchungen mit voneinander abhängigen Auswirkungen gleichzeitig auf. Der bei der überwiegenden Mehrzahl aller Erzeugnisse der Kabelindustrie dominierende Einflußfaktor ist die Temperatur. Für diesen Parameter liegen bisher auch die umfangreichsten Kenntnisse (Alterungsgesetze, Lebensdauerermittlung usw.) vor. Für alle anderen Einflußfaktoren mit Ausnahme der energiereichen Strahlung gibt es erprobte praxisnahe Prüfungen, die in großer Vielfalt auch für kombinierte Beanspruchungen (Multistreß) Eingang in die nationalen und internationalen Vorschriftenwerke (z. B. TGL, VDE, IEC) gefunden haben. Für die Kabelpraxis sind zur Bewertung und Prüfung der Zuverlässigkeit die vorliegenden Prüfverfahren und Vorschriften im allgemeinen ausreichend. Eine Ausnahme ist noch die Bewertung des Einflusses energiereicher Strahlung in Parameterbereichen, wie sie z. B. in Kernkraftwerken (KKW) vorliegen.

Tafel 1
Installierte Leistung in KKW (Stand Dez. 1987) aus [1]

Land	Gesamtleistung [GW]
Argentinien	0,9
Belgien	5,5
Brasilien	0,6
Bulgarien	2,7
DDR	1,7
BRD	18,9
Finnland	2,3
Frankreich	48,8
Indien	1,2
Italien	1,3
Japan	26,9
Jugoslawien	0,6
Kanada	11,8
Südkorea	5,4
Niederlande	0,5
Pakistan	0,1
Schweden	9,6
Schweiz	2,9
Spanien	6,5
Südafrika	1,8
Taiwan	4,9
ČSSR	3,4
Ungarn	1,6
UdSSR	34,5
USA	96,5
Großbritannien	11,8
	302,7

Dr.-Ing. *Dietrich Flügge* ist Abteilungsleiter, Dr.-Ing. *Lutz Röhr* ist Gruppenleiter im Bereich Forschung und Entwicklung des VEB Kabelwerk Oberspree (KWO) „Wilhelm Pieck".

Tafel 2. Betriebsbedingungen für Kabel im hermetischen Teil eines KKW mit Druckwasserreaktor [3]

	Normalbetrieb	kleine Havarie	große Havarie
Umgebungstemperatur	60 °C	90 °C	150 °C
Strahlungsdosis	0,1 Gy/h	1 Gy/h	1000 Gy/h
relative Luftfeuchtigkeit	··· 100 %	··· 100 %	··· 100 %
Luftdruck	100 kPa	170 kPa	500 kPa
Häufigkeit	–	1/6 a	1/30 a
Dauer der Havarie	–	5 h	10 h

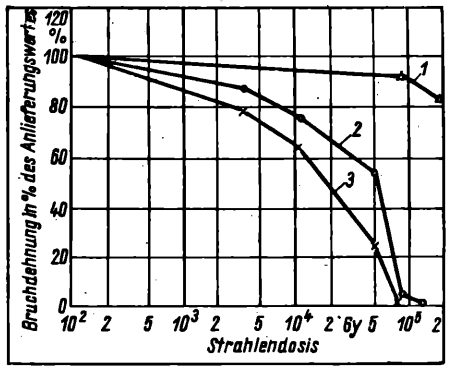


Bild 1. Einfluß der Dosisleistung auf die Veränderung von PE. In Gy/h: *1* DL $3 \cdot 10^6$; *2* DL 5,5 [4]; *3* DL 1,5 [4]

1. Multistreßbeanspruchung in KKW

1.1. Bedeutung der Kernenergie

Seit der Inbetriebnahme des ersten experimentellen Kernreaktors durch *Fermi* im Jahre 1942 hat die Kernenergie bis heute schon eine beachtenswerte Bedeutung für die Deckung des Energiebedarfs erlangt. Ende 1987 waren weltweit 400 Kernreaktoren in Kraftwerken mit einer Gesamtleistung von über 300 GW in Betrieb (s. Tafel 1).

Für 1990 wird ein Anstieg der in KKW installierten Leistung auf 357 GW und für 1995 auf 427 GW prognostiziert [1] [2]. In einigen Ländern hat die Kernenergie bereits eine führende Position bei der Erzeugung von Elektroenergie erlangt (z. B. Anteil der Kernenergie in Frankreich 55 %, in Belgien 52 % und in der Schweiz über 40 %).

Immer mehr Betriebsmittel müssen also unter mehr oder weniger starkem Einfluß energiereicher Strahlen zuverlässig funktionieren. Damit ist auch bei den Kabeln eine neue gravierende Beanspruchung hinzugekommen, für die die Frage zu beantworten ist, ob die Beständigkeit gegenüber energiereicher Strahlung in einfacher Weise separat untersucht werden kann oder ob der Praxis entsprechende gleichzeitige Einwirkungen anderer Beanspruchungen (Multistreß) zu anderen Ergebnissen führen.

1.2. Typische Parametergrenzen für die Multistreßbeanspruchung in Kernkraftwerken

Im Gegensatz zu den normalen Kraftwerksbereichen sind Kabel ebenso wie andere Betriebsmittel im hermetischen Teil von KKW dauernd einer niedrigen und im Havariefall kurzzeitig einer hohen Strahlenbelastung und erhöhten Drücken ausgesetzt; außerdem müssen sie neben der elektrischen Beanspruchung zusätzlich höheren Umgebungstemperaturen standhalten. Diese speziellen Beanspruchungen sind je nach Kraftwerkstyp und Havariebedingungen unterschiedlich. In der Tafel 2 sind als Beispiel die entscheidenden Betriebsbedingungen für Kabel im hermetischen Teil eines KKW-Blocks mit Druckwasserreaktor zusammengestellt. Die Strahlenbelastung der Kabel wird im wesentlichen durch Gamma-Strahlung verursacht. Alpha-Strahlung besitzt wegen ihrer geringen Reichweite im KKW keine Bedeutung. Beta-Strahlung ist ebenfalls bedeutungslos, da sie bereits durch relativ dünne Materialschichten (Größenordnung mm ··· cm) abgeschirmt werden kann.

Die dominierenden Strahlenquellen in KKW sind die aktive Zone des Reaktors (Neutronen- und Gamma-Strahlung), verbrauchte Brennelemente (Gamma-Strahlung) und der Kühlkreislauf (Gamma-Strahlung). Die Neutronen- und Gammastrahlung der aktiven Zone wird durch Wasser-, Stahl- und Betonschichten abgeschirmt, die Strahlung der verbrauchten Brennelemente durch das Wasser des Abklingbeckens. Relevant für die Strahlenalterung der Kabel im hermetischen Bereich, speziell in den während des Betriebes nicht zugänglichen Anlagenräumen ist die vom Stickstoff-16 im Druckwasser ausgehende Gammastrahlung des Kühlmittelkreislaufs [4].

1.3. Kenntnisstand zur Strahlenalterung hochpolymerer Kabelwerkstoffe

1.3.1. Strahlenchemische Reaktionen in Hochpolymeren

Energiereiche geladene Teilchen wie die Elektronen der Beta-Strahlung reagieren beim Durchgang durch Materie fast ausschließlich mit den Hüllenelektronen und verursachen dabei Anregung oder Ionisation. Die Photonen der Gamma-Strahlung erzeugen durch Comptonstreuung und Paarbildung im bestrahlten Medium energiereiche Elektronen, die ihrerseits wieder Ionisation und Anregung bewirken können. Das bedeutet, daß die Wirkung von Beta- und Gamma-Strahlung prinzipiell gleich ist. Infolge der Ionisations- und Anregungsakte und durch weiteren Zerfall angeregter Moleküle entstehen Ionen und freie Radikale. Insbesondere die freien Radikale besitzen eine große Reaktionsfähigkeit, durch die in der bestrahlten Materie folgende Sekundärreaktionen ausgelöst werden können:

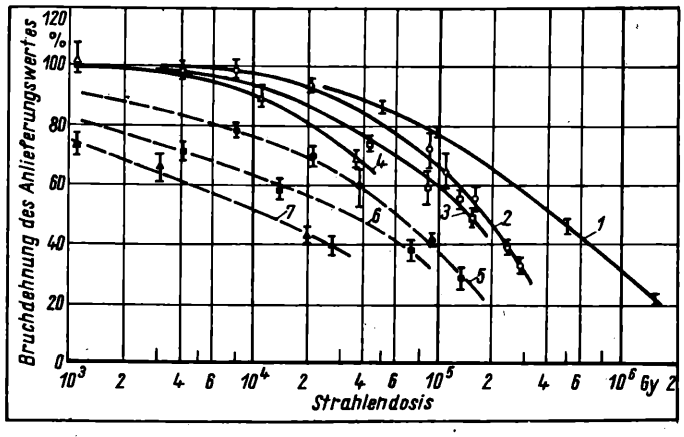


Bild 2. Veränderung der Bruchdehnung von EPDM in Abhängigkeit von der Strahlendosis; *1* $3 \cdot 10^6$ Gy/h, 20 °C; *2* 10 Gy/h, 20 °C; *3* 5,5 Gy/h, 20 °C; *4* 1,5 Gy/h, 20 °C; *5* 10 Gy/h, 90 °C; *6* 5,5 Gy/h, 90 °C; *7* 1,5 Gy/h, 90 °C

— Vernetzung
— Abbau von Makromolekülen durch Kettenspaltung
— Änderung des Grades der Ungesättigtheit
— Bildung niedermolekularer oder gasförmiger Spaltprodukte
— Verminderung der Kristallinität kristalliner Polymere
— Reaktionen mit Umgebungsmedium, z. B. Oxidation.

Diese Sekundärreaktionen sind die Ursache für die Veränderung der mechanischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften der Werkstoffe durch Bestrahlung. Der Umfang der auftretenden Sekundärreaktionen ist abhängig von der absorbierten Strahlendosis (Maßeinheit Gray: 1 Gy = 1 J/kg) und auch abhängig von den Bestrahlungsbedingungen (Dosisleistung, Umgebungsmedium).

1.3.2. Dosisleistungsabhängigkeit der Strahlenalterung

Am Beispiel von PE (Bild 1) ist zu sehen, daß die gleiche absorbierte Strahlendosis bei Kurzzeitbestrahlung (KZB) mit hoher Dosisleistung (DL) zu einem vernetzten PE-Material mit ausgezeichneten Eigenschaften führt, während bei Langzeitbestrahlung (LZB) mit niedriger DL das PE völlig abgebaut wird. Dieser Unterschied im Ergebnis von KZB und LZB ist auf den Einfluß des Luftsauerstoffs und auf die strahleninduzierten Sekundärreaktionen zurückzuführen; er tritt also bei Bestrahlung im Vakuum oder in Inertgasatmosphäre nicht auf. Der Sauerstoffeinfluß ist nach [5] bei thermoplastischen Stoffen wie PE, PP und PVC stark ausgeprägt, während er bei Elastomeren geringer oder nicht feststellbar ist.

Als Kriterium für die Bestimmung der Strahlenbeständigkeit wird ähnlich wie bei der thermischen Beständigkeit bei Hochpolymeren im allgemeinen die Bruchdehnung genutzt, da sie am sensibelsten auf entsprechende Alterungen reagiert.

Ergebnisse von im KKW durchgeführten[1]) KZB- und LZB-Untersuchungen zeigen, daß in Abhängigkeit von der absorbierten

[1]) Die Bestrahlung erfolgte im Zentralinstitut für Festkörperphysik und Werkstoffforschung der AdW in Dresden.

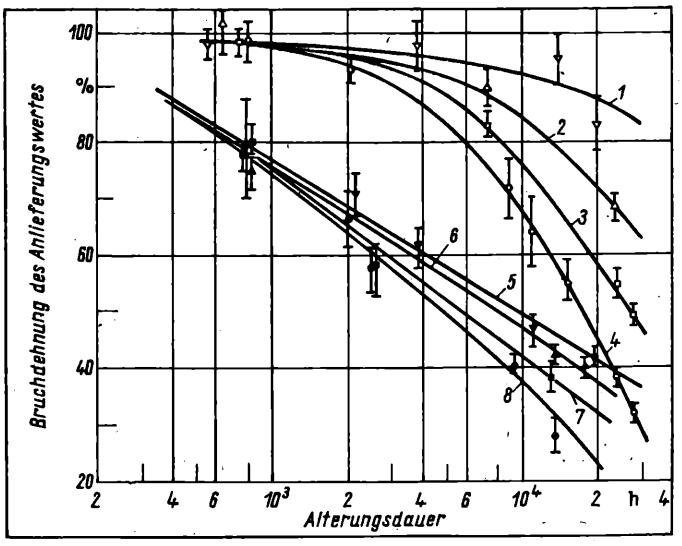


Bild 3. Veränderung der Bruchdehnung von EPDM durch thermische und Strahlenalterung in Abhängigkeit von der Alterungsdauer; *1* 20 °C; *2* 1,5 Gy/h, 20 °C; *3* 3,5 Gy/h, 20 °C; *4* 10 Gy/h, 20 °C; *5* 90 °C; *6* 1,5 Gy/h, 90 °C; *7* 5,5 Gy/h, 90 °C; *8* 10 Gy/h, 90 °C

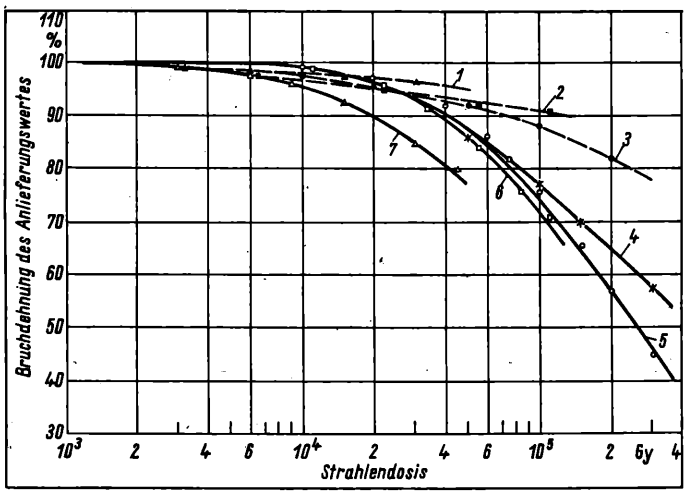


Bild 4. Veränderung der Bruchdehnung von EPDM infolge des strahlenchemischen Effekts; *1* 1,5 Gy/h, 90 °C; *2* 5,5 Gy/h, 90 °C; *3* 10 Gy/h, 90 °C; *4* $3 \cdot 10^4$ Gy/h, 20 °C; *5* 10 Gy/h, 20 °C; *6* 5,5 Gy/h, 20 °C; *7* 1,5 Gy/h, 20 °C

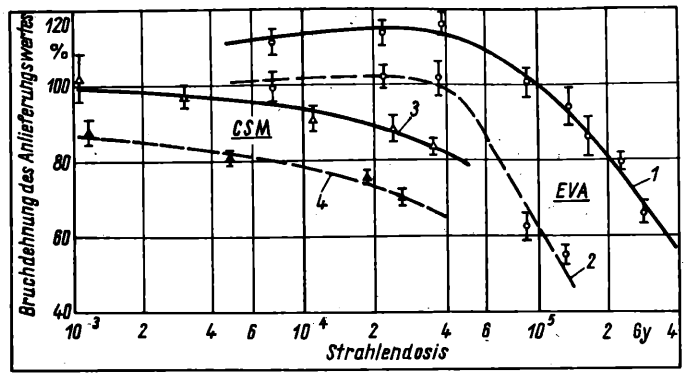


Bild 5
Veränderung der Bruchdehnung von CSM und EVA in Abhängigkeit von der Strahlendosis
1 10 Gy/h, 20 °C
2 10 Gy/h, 90 °C
3 1,5 Gy/h, 20 °C
4 1,5 Gy/h, 90 °C

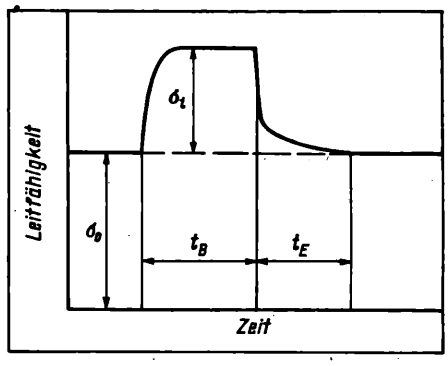


Bild 6
Prinzipielles Verhalten der Leitfähigkeit von Hochpolymeren bei Bestrahlung
σ_0 Leitfähigkeit ohne Bestrahlung
σ_i Strahleninduzierte Leitfähigkeit
t_B Bestrahlungszeit
t_E Erholungszeit

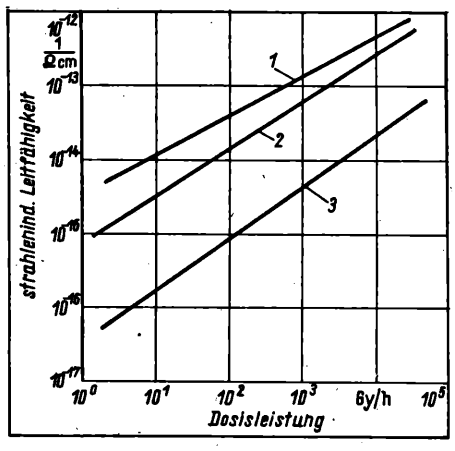


Bild 7
Strahleninduzierte Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der der DL
1 PUR
2 CSM
3 EPDM

Strahlendosis die Tendenz der Veränderung der Bruchdehnung praktisch unabhängig von der DL ist, der Grad der Schädigung jedoch von der DL bestimmt wird (Bilder 1 und 2).

Zur Klärung des DL-Einflusses muß aber besonders bei Elastomeren die Überlagerung von natürlicher Alterung (Eigenschaftsänderung bei Lagerung unter Normalbedingungen) und eigentlichem strahlenchemischem Effekt beachtet werden. Im Bild 3 ist die Veränderung der Bruchdehnung von EPDM in Abhängigkeit von der Alterungsdauer durch narürliche und thermische Alterung sowie durch Strahlenalterung bei 20 und 90 °C dargestellt.

Aus der Differenz der Bruchdehnungswerte nach Strahlenalterung und natürlicher Alterung bei 20 °C bzw. Strahlenalterung und rein thermischer Alterung bei 90 °C wurden die auf den strahlenchemischen Effekt zurückzuführenden Änderungen ermittelt.

Bild 4 zeigt nun, daß der zur Veränderung der Bruchdehnung führende strahlenchemische Effekt dosisleistungsabhängig ist und daß auch bei Elasten mit einer DL-Abhängigkeit der Strahlenschädigung gerechnet werden muß.

Die Veränderung der jeweiligen Eigenschaften kann dabei allein durch den strahlenchemischen Effekt oder aber auch durch strahlenchemische Effekte überlagert mit natürlicher oder thermischer Alterung bewirkt werden. Die DL-Abhängigkeit selbst wird, wie bereits erwähnt, durch den während der Bestrahlung in die Proben diffundierenden Luftsauerstoff bewirkt.

Es zeigt sich also, daß mit KZB zwar die Tendenz der durch energiereiche Strahlen verursachten Eigenschaftsänderungen ermittelt werden kann, daß aber zur Beurteilung der Strahlenbeständigkeit, d.h. des Ausmaßes der Strahlenschädigung, nur LZB unter möglichst praxisnahen Bedingungen aussagefähig sind.

1.3.3. Kombinierte thermische- und Strahlenbeanspruchung

Werden Materialien bei erhöhter Temperatur bestrahlt (Multistreßbeanspruchung), wirkt neben der Strahlenalterung zusätzlich die thermische Alterung. Die Veränderung der Eigenschaften hochpolymerer Werkstoffe ist bei kombinierter Strahlen- und thermischer Alterung im allgemeinen größer als bei reiner Strahlenalterung (Bilder 2, 3 und 5).

Dabei zeigt sich, daß der auf die thermische Alterung zurückzuführende Anteil der Veränderungen größer ist als der durch den strahlenchemischen Effekt bewirkte Anteil.

Es kann weiterhin festgestellt werden, daß der strahlenchemische Effekt bei reiner Strahlenalterung wesentlich größer sein kann als bei kombinierter Alterung (Bild 4).

Eine Erklärung wird in der hohen Wirksamkeit der thermischen Degradation und der daraus resultierenden Veränderung des notwendigen Energieniveaus der Strahlung auf die verbliebenen Umwandlungsprodukte und -strukturen gesehen. Die Tendenz der Eigenschaftsänderungen bei rein thermischer Alterung, reiner Strahlenalterung und kombinierter Alterung ist prinzipiell gleich. Obwohl das makroskopisch wirksame Ergebnis von thermischer und Strahlenalterung gleich ist, liegen den Eigenschaftsänderungen unterschiedliche Mechanismen zugrunde. So besteht nach [6] [7] ein prinzipieller Unterschied zwischen Strahlungsabbau und rein thermischer Degradation. Thermische Beanspruchung bewirkt bei Hochpolymeren die Depolymerisation von Kettenmolekülen, in deren Folge Monomere entstehen. Für den Strahlungsabbau ist dagegen der Hauptkettenbruch charakteristisch. Dabei entstehen Makromoleküle unterschiedlicher Abmessungen.

Bei Olefinen erfolgt jedoch der Bruch der Kohlenstoff-Kohlenstoff-

bindungen vorwiegend an Kettenenden und Verzweigungen. Der statistische Hauptkettenbruch kommt bei ihnen selten vor.

1.3.4. Kombinierte elektrische und Strahlenbeanspruchung

Isolierstoffe zeigen unter der Einwirkung energiereicher Strahlung sowohl irreversible Veränderungen (Alterung) als auch reversible Veränderungen der elektrischen Eigenschaften, wobei letztere eine besondere Bedeutung im Havariefall besitzen, da sie stark dosisleistungsabhängig sind.

1.3.4.1. Reversible Veränderung der elektrischen Eigenschaften

Die Leitfähigkeit organischer und anorganischer Stoffe kann bei Bestrahlung in Abhängigkeit von der DL und der Temperatur um mehrere Größenordnungen ansteigen.

Für die Beurteilung der Verwendungsfähigkeit von Isolierstoffen für KKW-Kabel ist deshalb die Kenntnis der Dosisleistungs- und Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit wichtig.

Einige Isolierstoffe, wie PE, PVC, PTFE und Quarz ([8] bis [10] u.a.) sind mit dem Ziel der Klärung des Leitungsmechanismus bei Bestrahlung untersucht worden. Da sich die Ergebnisse nicht direkt auf die für die Herstellung von KKW-Kabeln vorgesehenen Materialien übertragen lassen, wurden im Kombinat KWO mit Hilfe koaxialer Modellkabel die Veränderungen der Leitfähigkeit von Stoffen, wie EPDM, CSM und PUR in Abhängigkeit von der DL im Bereich $10^0 \cdots 3 \cdot 10^4$ Gy/h und der Einwirkzeit der Strahlung (1 ··· 1000 min) sowie von der Temperatur bestimmt. Bei der Durchführung der Experimente zeigte sich, daß unmittelbar nach Bestrahlungsbeginn die Leitfähigkeit anstieg und nach einer endlichen Zeit einen konstanten Wert erreichte.

Nach Entfernen der Strahlenquelle fiel die Leitfähigkeit wieder ab und strebte einem Endwert zu, der bei nicht zu großen absorbierten Strahlendosen mit dem Ausgangswert vor der Bestrahlung identisch war (Bild 6). Nach Abklingen der Einschwingvorgänge besitzt die strahleninduzierte Leitfähigkeit von Hochpolymeren einen konstanten Wert, der mit der DL der applizierten Strahlung nach [8] [9] [11] in folgendem funktionalem Zusammenhang steht

$$\sigma_i = K \cdot DL^{\Delta} \qquad (1)$$

σ_i strahleninduzierte Leitfähigkeit [1/Ω cm]
DL Dosisleistung [Gy/h]
K materialspezifische Konstante

Nach [12] ist

$$\Delta = T_1/T + T_1 \qquad (2)$$

wobei T_1 eine Materialkonstante mit der Dimension der Temperatur ist.

Sind für ein Material Δ und K bekannt, kann die strahleninduzierte Leitfähigkeit für jede DL berechnet werden. Es wurde deshalb im vorgegebenen DL-Bereich der Isolationswiderstand der Modellkabel gemessen und daraus die entsprechende strahleninduzierte Leitfähigkeit berechnet. Aus den im Bild 7 dargestellten Ausgleichsgeraden $\sigma_i = f(DL)$ wurden die Konstanten Δ und K wie folgt bestimmt:

EPDM $\sigma_i = 0{,}36 \cdot 10^{-16} \cdot DL^{0{,}70}$ [1/Ω cm]
CSM $\sigma_i = 0{,}76 \cdot 10^{-15} \cdot DL^{0{,}64}$ [1/Ω cm]
PUR $\sigma_i = 0{,}33 \cdot 10^{-14} \cdot DL^{0{,}54}$ [1/Ω cm].

Die sich daraus ergebende strahleninduzierte Erhöhung der Leitfähigkeit bei 20 °C ist im Bild 8 gezeigt.

Dabei ist zu sehen, daß Isolierstoffe mit hohem spezifischem Widerstand einen höheren Leitfähigkeitsanstieg bei Strahlenbeanspruchung aufweisen als solche mit niedrigem spezifischem Widerstand.

Die Temperaturabhängigkeit der strahleninduzierten Leitfähigkeit kann nach [9] [12] [13] mit Hilfe folgender Beziehung ermittelt werden:

$$\sigma_i \sim DL^{\Delta} \cdot N_c^{T/T + T_1} \quad \text{mit} \qquad (3)$$

$N_c \approx 10^{19} \cdot (T/300)^{3/2}$ für Hochpolymere.

Für EPDM ergibt sich dabei bezüglich der Multistreßbeanspruchung Strahlung, Temperatur und elektrische Spannung, daß die strahleninduzierte Leitfähigkeit bei der für KKW-Kabel dauernd zulässigen Leitergrenztemperatur von 90 °C gegenüber der bei 20 °C um den Faktor 8,7 ansteigt, während dieser Faktor bei der im Havariefall maximal auftretenden Leitergrenztemperatur von 180 °C (Umgebungstemperatur bei der großen Havarie 150 °C) 96 beträgt. In der Tafel 3 sind die Werte der Leitfähigkeit von EPDM für Normal- und Havariebetrieb für reinen Strahlungseinfluß und kombinierte

Tafel 3
Leitfähigkeit von EPDM in Abhängigkeit von der Temperatur und der Dosisleistung

Temperatur °C	σ_0 1/Ω cm	Dosisleistung σ_i 1/Ω cm	
		Normalbetrieb mit 10^{-1} Gy/h	Havarie mit 10^3 Gy/h
20	$5 \cdot 10^{-16}$	$0{,}07 \cdot 10^{-16}$	$4{,}53 \cdot 10^{-16}$
90	$2 \cdot 10^{-13}$	$0{,}62 \cdot 10^{-16}$	$3{,}94 \cdot 10^{-14}$
180	$3 \cdot 10^{-11}$	$6{,}7 \cdot 10^{-16}$	$4{,}35 \cdot 10^{-13}$

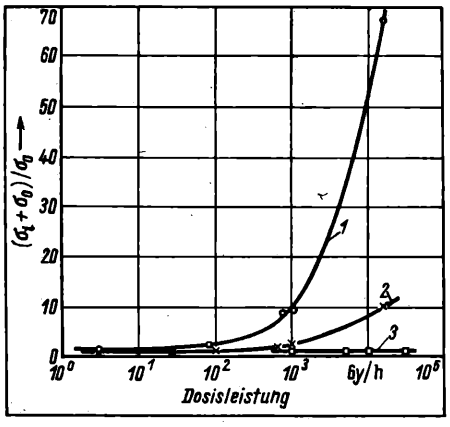


Bild 8
Leitfähigkeitsanstieg bei Bestrahlung
1 EPDM
2 CSM
3 PUR

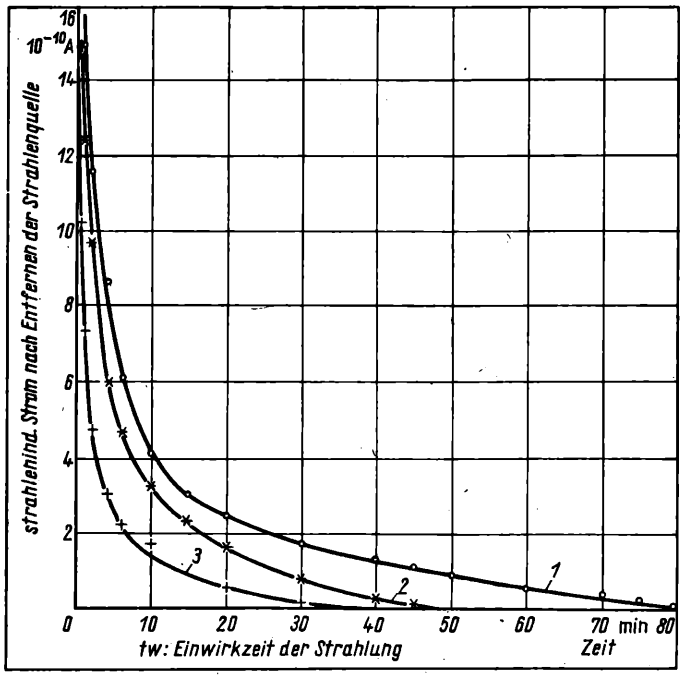


Bild 9. Abklingverhalten des Strahleninduzierten Stromes bei EPDM nach Entfernen der Strahlenquelle (DL 10^3 Gy/h)
Kurve 1 Aw = 1000′; Kurve 2 Aw = 10′; Kurve 3 Aw = 1′

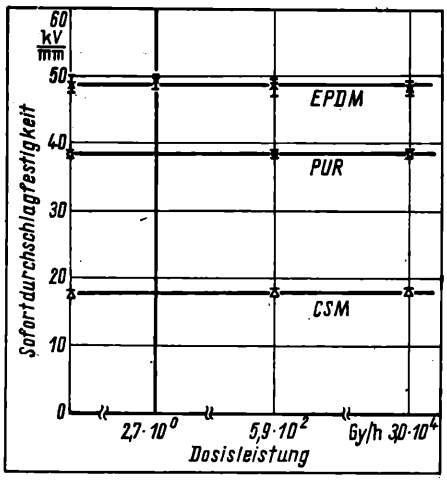


Bild 10
Sofortdurchschlagfestigkeit bei Wechselspannung in Abhängigkeit von der Strahlendosis

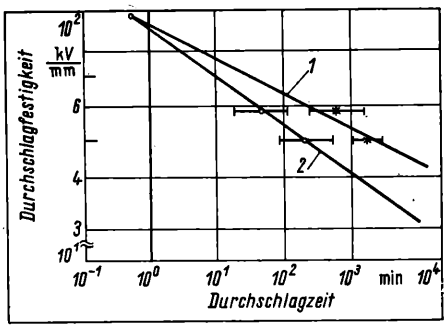


Bild 11
Zeit-Durchschlagkurven für EPDM
1 ohne Bestrahlung, $n = 13$
2 bei Bestrahlung, $n = 9$
DL $3 \cdot 8\ 10^2$ Gy/h

Temperatur- und Strahlenbeanspruchung zusammengestellt. Es zeigt sich auch hier, daß der Einfluß der Temperatur den der Strahlung um ein Vielfaches übersteigt. Der größte Leitfähigkeitsanstieg tritt im Havariefall auf mit dem Faktor

$$\frac{(\sigma_0 + \sigma_i)_{180\,°C}}{\sigma_{0\,20\,°C}} = 6{,}1 \cdot 10^4,$$

d.h., der Isolationswiderstand von EPDM fällt bei Eintreten der großen Havarie von $2 \cdot 10^{15}\ \Omega$ cm auf $3{,}3 \cdot 10^{10}\ \Omega$ cm.
Der Leitfähigkeitsanstieg ist bei nicht zu großen Einwirkzeiten von Strahlung und Temperatur (z. B. auch noch bei der großen Havarie) praktisch voll reversibel, wobei der strahleninduzierte Strom nach Entfernen der Strahlenquelle nach einer hyperbolischen Funktion wieder abfällt (Bild 9).
Hinsichtlich des Verlustfaktors zeigen Hochpolymere ein ähnliches Verhalten wie bei der Leitfähigkeit. Die strahleninduzierten Veränderungen sind aber z. B. wie bei EPDM so gering, daß sie technisch keine Relevanz besitzen.

1.3.4.2. Irreversible Veränderungen der elektrischen Eigenschaften

Die Frage der irreversiblen Veränderung elektrischer Eigenschaften Hochpolymerer bei gleichzeitiger elektrischer und Strahlenbeanspruchung betrifft im wesentlichen die Beeinflussung der elektrischen Durchschlagfestigkeit bei Kurz- und Langzeitbeanspruchung.
Die Untersuchung der elektrischen Sofortdurchschlagfestigkeit erfolgte an Plattenprüflingen im homogenen Kugel-Platte-Feld mit Hilfe des Spannungssteigerungsversuchs bei gleichzeitiger Bestrahlung im DL-Bereich $10° \cdots 3 \cdot 10^4$ Gy/h. Die Ergebnisse im Bild 10 zeigen, daß zwischen der Sofortdurchschlagfestigkeit bei und ohne Strahlungsbeanspruchung kein signifikanter Unterschied besteht, d.h., energiereiche Strahlung hat bis zu einer DL von $3 \cdot 10^4$ Gy/h keinen Einfluß auf die Sofortdurchschlagfestigkeit der Materialien EPDM, CSM und PUR. Dieses Ergebnis stimmt qualitativ zwar mit Ergebnissen in [14] [15] überein, widerspricht aber der Anschauung, daß durch die Strahlung im Dielektrikum eine große Anzahl freier Elektronen erzeugt wird, die ihrem Energiegehalt nach zu den heißen Elektronen zu rechnen sind und die demzufolge auch den Durchschlagprozeß beeinflussen müßten. Eine Abschätzung des Energiegehalts und der Anzahl der durch die Strahlung erzeugten Elektronen zeigt, daß bei einer DL von $3 \cdot 10^4$ Gy/h etwa 10^5 freie Elektronen pro cm^3 im durch die Feldstärke beeinflußten Volumen erzeugt werden, unter denen sich auch eine Anzahl heißer Elektronen befindet [16].
Der Sofortdurchschlag bei Wechselspannung geht in Feststoffen im allgemeinen von Störstellen in der Isolierung aus, an denen örtlich eine wesentlich höhere Feldstärke als im übrigen Isolierstoffvolumen herrscht. Maßgebend ist deshalb nur die Elektronendichte an den Störstellen und nicht im Gesamtvolumen. Die durch die Strahlung bei einer DL von $3 \cdot 10^4$ Gy/h induzierten 10^5 Elektronen/cm^3 werden aber statistisch verteilt im gesamten Volumen erzeugt. Weiterhin ist die strahleninduzierte Elektronendichte vernachlässigbar gegenüber der für einen Spontandurchschlag erforderlichen Dichte von $10^{18} \cdots 10^{20}$ Elektronen/cm^3. Eine Beeinflussung der Sofortdurchschlagfestigkeit ist erst bei DL größer 10^{13} Gy/h zu erwarten [16]. Derartig hohe DL treten aber in KKW nicht auf.
Es besteht jedoch die Frage, ob bei der Multistreßbeanspruchung Strahlung — elektrische Feldstärke die strahleninduzierten freien Elektronen einen Einfluß auf die elektrische Langzeitfestigkeit besitzen. Es wurde deshalb die Langzeitfestigkeit von EPDM im Konstantspannungsversuch bei Strahlungsalterung mit einer DL von $3{,}8 \cdot 10^2$ Gy/h sowie ohne Strahlung untersucht.
Aus dem Bild 11 ist ersichtlich, daß bei Bestrahlung der Durchschlag eher erfolgt und außerdem der Lebensdauerexponent n verkleinert wird.

Der Langzeitdurchschlag im Hochpolymeren kann nach [17] bis [19] auf die Wirkungsweise heißer Elektronen zurückgeführt werden, wobei der Prozeß feldstärke- und zeitabhängig ist. Durch die bei der Multistreßbeanspruchung Feldstärke — energiereiche Strahlung zusätzlichen strahleninduzierten Elektronen, von denen wegen des breiten Energiespektrums ein Teil heiße Elektronen sind, wird die Zahl der heißen Elektronen im Dielektrikum und damit die Zahl der durch sie verursachten irreversiblen Zerstörungsakte vergrößert. Daraus resultiert nach [16] eine Verkürzung der Durchschlagzeit. Die experimentell festgestellte Beeinflussung des Lebensdauerexponenten kann somit auf die Anzahl und Wirkungsweise heißer Elektronen bei Langzeitbeanspruchung zurückgeführt werden.
Für die Anwendung ergibt sich daraus, daß die Langzeitdurchschlagfestigkeit hochpolymerer Isolierungen bei Einwirkung energiereicher Strahlung verringert wird.

2. Schlußfolgerungen für die Auswahl von Materialien

Aus dem Dargelegten ergibt sich für die Beurteilung und Auswahl von Materialien für KKW-Kabel die Notwendigkeit, die in KKW auftretenden Beanspruchungen in ihrer Komplexität als Multistreßbeanspruchung zu berücksichtigen.
Eine Vorauswahl kann auf der Basis der meist bekannten Temperaturbeständigkeit der Materialien und aufgrund von Ergebnissen aus KZB erfolgen. Für die endgültige Beurteilung sind kombinierte Prüfungen, wie

- LZB bei erhöhter Temperatur
- Dauerspannungsprüfungen bei Bestrahlung
- Ermittlung der transienten Leitfähigkeit bei Bestrahlung und erhöhter Temperatur

im Rahmen der Beanspruchungsparameter für den hermetischen Teil in KKW erforderlich.

Literatur

[1] Kernenergie: USA und Frankreich an der Spitze. ETZ 109 (1988) 10, S. 470
[2] IAEA-Report 1987 „Nuclear Energy and its Fuel Cycle". Prospects to 2025, S. 23
[3] *Danis, J.; Lazar, K.:* Prüfung von in KKW angewandten Kabelverbindungen und Garnituren unter besonderen Störverhältnissen. Vortrag zum 28. Int. Wiss. Koll. Ilmenau 1983
[4] Betrieb und Instandhaltung von Kernkraftwerken. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1987
[5] *Wuckel, L.; Koch, W.:* Beurteilung der Strahlenbeständigkeit hochpolymerer Werkstoffe. Isotopenpraxis (1972) 1, S. 1
[6] *Berr, J.:* Beständigkeit elektrotechnischer Werkstoffe gegenüber ionisierender Strahlung. EKT (tschech.) (1974), S. 41
[7] *Dole, M.;* u.a.: Irradiation of PE. Journ. Am. Chem. Soc. 80 (1958), S. 1580
[8] *Adamec, V.:* Temporary changes in electrical properties of dielectrics due to ionizing radiation. Journ. of Polymer Science, Part A 2 (1968), S. 1241
[9] *Fowler, J. F.:* X-ray induced conductivity in insulating materials. Proc. Roy. Soc. London (1956), S. 164
[10] *Vul, B. M.:* Einfluß der Gammastrahlung auf die elektrische Leitfähigkeit der Dielektrika: Fizika Tverdowo Tela (1961) 3, S. 2264
[11] *Yahagi, K.;* u.a.: Insulation Resistance in PE and Teflon under irradation; Denki Gakkei Zasshi (1963) 83, S. 292
[12] *Rose, A.:* An outline of photoconductive processes. RCA-Review (1951), S. 362
[13] *Vajsberg, S. E.;* u.a.: Untersuchung der strahleninduzierten elektrischen Leitfähigkeit von Polymeren. Vysokomol. Soed. A 12 (1971), S. 2502
[14] *Werner, W.:* Über den Durchschlag fester Isolatoren; Ann. d. Physik, (1928), S. 95
[15] *Tsutsumi, Y.; Kako, Y.:* Dielectric breakdown of PE under gamma irradiation. Proc. IEEE (1975), S. 223
[16] *Flügge, D.; Röhr, L.:* Durch energiereiche Stahlung verursachte Veränderungen in hochpolymeren Werkstoffen für Starkstromkabel. Diss. TH Ilmenau 1977
[17] *Böttger, O.:* Langzeitdurchschlagverhalten von PE an Kabeln. Bull. SEV (1973), S. 143
[18] *Patsch, R.:* Über den Gültigkeitsbereich eines einheitlichen Durchschlagmechanismus bei Hochpolymeren. Bull. SEV (1974), S. 969
[19] *Böttger, O.; Patsch, R.:* Zusammenhang zwischen Streumechanismus und Langzeitdurchschlagfestigkeit bei Hochpolymeren. Bull. SEV (1974), S. 221

EA 6129

Elektrische Lebensdauer von Polyethylen-Kabelisolierungen bei Betriebstemperatur[1)]

M. Eberhardt, KDT; C. S. Li, Dresden

Die Isolierung von Polyethylen-Energiekabeln ist im praktischen Betrieb aufgrund der Stromwärmeverluste des Leiters höheren Temperaturen (bei VPE zulässige Betriebstemperatur 90 °C, Überlasttemperatur bis 130 °C) ausgesetzt. Dabei wird die notwendige Formstabilität des Polyethylens (PE) durch Vernetzung (VPE) erreicht, die Stabilität gegen thermische Alterung durch Zusatz von thermischen Stabilatoren, den sog. Antioxidantien. Es erhebt sich die Frage, ob diese höheren Temperaturen auch einen Einfluß auf die elektrische Lebensdauer der Polyethylen-Isolierung haben. Von Polyethylenisolierungen ist bisher eine Vielzahl von elektrischen Lebensdauerkennlinien ermittelt worden, fast ausschließlich bei 20 °C. Von anderen Isolierungen ist bekannt, daß die Temperatur die elektrische Lebensdauer verkürzen kann, und zwar durch Beschleunigung des elektrischen Alterungsprozesses, d.h., es kommt zu einer Parallelverschiebung der elektrischen Lebensdauerkurve zu kürzeren Durchschlagzeiten. Dies wurde bei Epoxidharz-Quarzmehl-, Epoxidharz-Glimmer- und Polyesterimidlackdraht-Isolierungen gemessen. Weiterhin kann die Temperatur die Neigung der Lebensdauerkennlinie verändern. Das tritt ein, wenn sich der Isolierstoff verändert, z. B. durch thermische Alterung, oder wenn der elektrische Alterungsprozeß in einen Wärmedurchschlag übergeht (Bild 1).

Über die Lebensdauer bei gleichzeitiger elektrischer und thermischer Belastung ist dagegen wenig bezüglich Polyethylen bekannt [1]. Deshalb wurde an chemisch vernetzten PE-Isolierungen untersucht, wie die Temperatur den Durchschlagprozeß bei Wechselspannungsbelastung beeinflußt [2] [3]. Zur Interpretation der Ergebnisse dienen Vergleichsuntersuchungen an unvernetzten PE-Isolierungen ohne Additive.

1. Prüfkörper

Die Ermittlung der Lebensdauer an Kabeln ist materialaufwendig und vor allem bei höherer Temperatur wegen der Potentialsteuerung am Kabelende recht schwierig. Deshalb wurden als Prüfkörper Modellkabel mit eingesenkten Nadel-Elektroden verwendet (Elektrodenabstand von 0,5 mm). Bei dem gewählten kleinen Elektrodenabstand und dem Radius der Spitzenelektrode von 50 µm — das entspricht einem Homogenitätsgrad von $\eta \approx 0{,}2$ — führt die Bildung des ersten Kanals unmittelbar zum Durchschlag. Die Kanalaufbauzeit ist in allen Fällen vernachlässigbar klein.

2. Unvernetztes Polyethylen ohne Zusätze

Im Konstantspannungsversuch ergeben sich Verteilungsfunktionen der Durchschlagzeiten, die durch die zweiparametrige Weibullverteilung

$$F(t_d) = 1 - \exp\left[-(t_d/t_{d63})^6\right] \quad (1)$$

beschrieben werden können. Die elektrische Lebensdauerkennlinie für 20 °C stellt in dem untersuchten Zeitbereich bis 3000 Stunden im doppeltlogarithmischen Maßstab eine Gerade dar mit der empirischen Lebensdauerbeziehung

$$U_d = k_d\, t_d^{-1/n} \quad (2)$$

(Bild 2). Bei 90 °C und 100 °C ergeben sich für Spannungen kleiner 8 kV Abweichungen von der empirischen Lebensdauerbeziehung. Aufgrund der sich einstellenden großen Durchschlagzeit können in diesem Fall thermische Alterungsprozesse wirksam werden. Das bestätigten IR-spektroskopische Untersuchungen des PE vor der

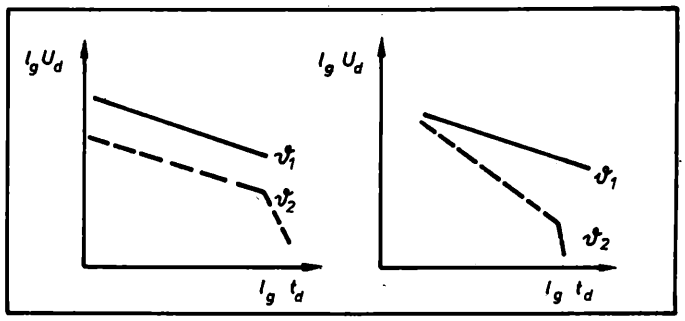


Bild 1. Temperatureinfluß auf die elektrische Lebensdauer von Feststoffisolierungen (schematisch)

$U_d = k_d\, t_d^{-1/n}$; $\vartheta_2 > \vartheta_1$

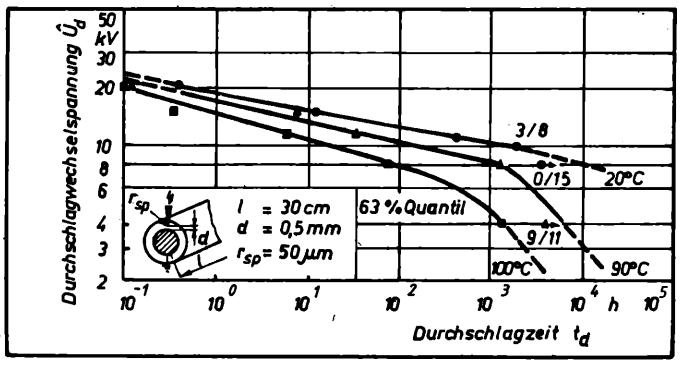


Bild 2. Elektrische Lebensdauerkennlinien von unvernetzten Polyethylenisolierungen ohne Additive bei 20 °C, 90 °C und 100 °C

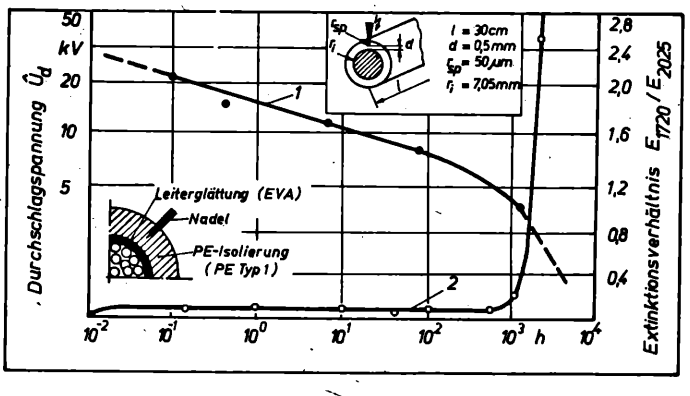


Bild 3. Elektrische Lebensdauer (1) und Carbonylindex (2) von Polyethylen ohne Additive, abhängig von der Zeit der elektrischen und thermischen Belastung bei 100 °C (Der Carbonylindex wurde an Mikrotomschnitten aus dem Bereich zwischen Nadelspitze und Leiterglättung gemessen).

Nadelspitze[2)]. Das Verhältnis aus der Carbonylextinduktion bei 1720 cm^{-1} und einer PE-Absorption bei 2025 cm^{-1} (Carbonylindex) als Maß für die durch die thermische Beanspruchung hervorgerufenen Oxidationsreaktionen steigt infolge einer thermischen Beanspruchung von 100 °C nach etwa 1500 Stunden stark an (Bild 3).

Bei Isolierungen aus Polyethylen ohne Antioxidantien kann sich also unter komplexer elektrischer und thermischer Belastung die Lebensdauer gegenüber der bei rein elektrischer Alterung verringern.

3. Chemisch vernetztes Polyethylen mit Zusätzen

Die Verteilungsfunktionen der Durchschlagzeiten chemisch vernetzten Polyethylens zeigen sowohl bei 20 °C (Bild 4) als auch bei höheren Temperaturen in dem untersuchten Zeitbereich Mischverteilungen zweier zweiparametriger Weibullverteilungen.

Physikalische Ursache dafür sind Zusätze im Polyethylen, die als Spannungsstabilisatoren wirken. Spannungsstabilisatormoleküle bewirken an Fehlstellen (Orte hoher Feldstärke) eine Verzögerung des elektrischen Alterungsprozesses gegenüber dem bei reinem PE ohne Zusätze. Im unteren Kurvenast der Mischverteilung wirken

Dozent Dr. sc. techn. *Martin Eberhardt* ist Forschungsgruppenleiter, Dr.-Ing. *Chol Su Li*, war Aspirant am Wissenschaftsbereich Hochspannungstechnik der Technischen Universität Dresden.

[1)] Die Arbeit entstand im Rahmen eines Forschungsauftrages des Kombinates VEB Kabelwerk Oberspree „Wilhelm Pieck" Berlin.

[2)] Die infrarotspektroskopischen Messungen wurden dankenswerterweise im Zentralinstitut für Festkörperphysik und Werkstofforschung der Akademie der Wissenschaften der DDR, Dresden, von Herrn Dr. rer. nat. *H. Wagner* durchgeführt.

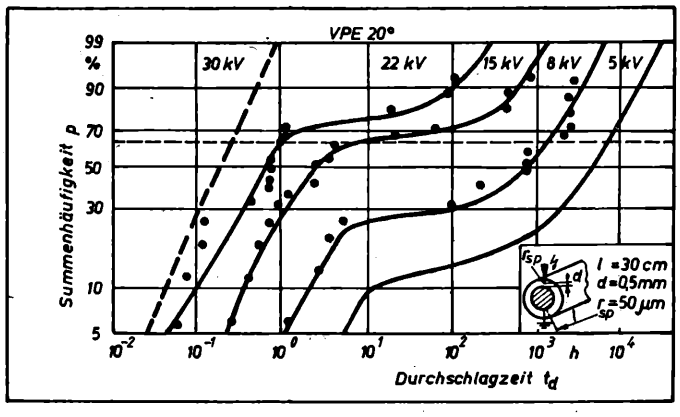


Bild 4. Durchschlagzeit von chemisch vernetzten PE-Isolierungen mit Antioxident für verschiedene Prüfspannungen bei 20 °C
——— gemessen – – – – berechnet

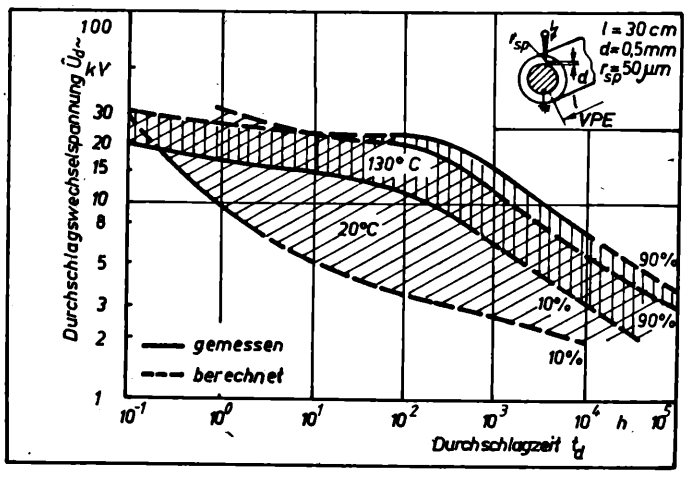


Bild 5. Elektrische Lebensdauerkennlinien (10 %- und 90 %-Quantile) von vernetzten PE-Isolierungen mit Antioxidant bei 20 °C und 130 °C

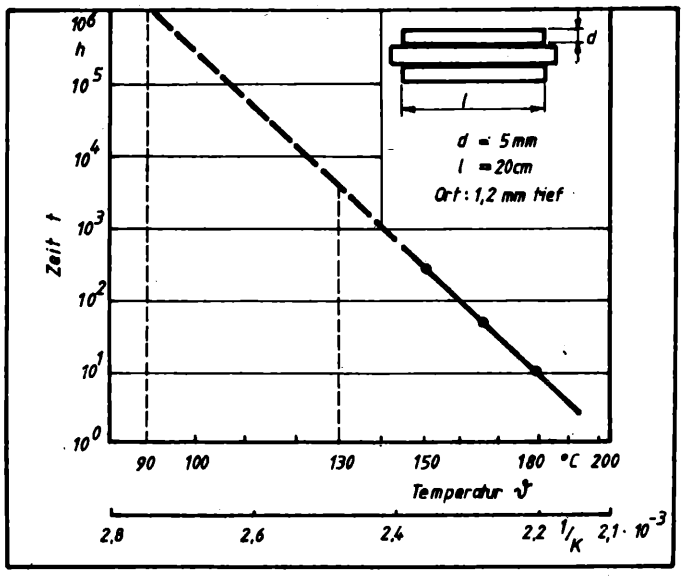


Bild 6. Temperaturabhängigkeit der thermischen Oxidation von chemisch vernetzten PE-Isolierungen mit Antioxidant Eigenschaftsgrenzwert: Carbonylindex $C_X = 0{,}8$

nur die Stabilisatormoleküle, die sich zufällig am Ort der Fehlstellen befinden. Je niedriger die Spannungsbeanspruchung, d.h. je größer die Beanspruchungszeiten, um so stärker ist der Einfluß der elektrisch stabilisierenden Stoffe infolge Migration (oberer Kurvenast der Mischverteilung).

Durch mathematische Auswertung dieser Mischverteilungen konnten die Lebensdauerkennlinien dargestellt und für größere Beanspruchungszeiten extrapoliert werden. Die dadurch erhaltenen Lebensdauerkennlinien sind im Bild 5 für das 10%- und 90%-Quantil (Temperaturen von 20 °C und 130 °C) dargestellt.

Im Gegensatz zu den elektrischen Lebensdauerkennlinien von PE-Isolierungen ohne Additive (Bild 2) zeigen die Kurven von chemisch vernetzten Prüfkörpern aus oxidativ stabilisiertem PE, daß sich z.T. größere Durchschlagzeiten bei erhöhter Temperatur (130 °C) als bei Zimmertemperatur ergeben. Dieses Ergebnis läßt sich nur erklären, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

— Die in den vernetzten Prüfkörpern enthaltenen niedermolekularen Additive (Vernetzungsspaltprodukte und Antioxidantien) wirken als Spannungsstabilisatoren.
— Die Zunahme der spannungsstabilisierenden Wirkung der Additive mit steigender Temperatur durch Erhöhung der Beweglichkeit in der PE-Matrix ist größer als die Abnahme der elektrischen Festigkeit des PE-Grundmaterials mit steigender Temperatur.
— Die spannungsstabilisierenden Additive oder mindestens ein Teil davon müssen bei 130 °C auch bis zur größten gemessenen Durchschlagzeit (3000 Stunden) im PE noch wirksam sein.
— Im vernetzten PE dürfen bei 130 °C auch bis zur größten Durchschlagzeit (3000 Stunden) keine oxidativen Schädigungen eintreten, die zu einer Beeinträchtigung der elektrischen Festigkeit führen.

Zur spannungsstabilisierenden Wirkung der Additive ist festzustellen, daß eine Langzeitwirkung der Vernetzerspaltprodukte bei 130 °C wegen deren Flüchtigkeit sehr unwahrscheinlich ist. Bereits nach 200 Stunden Temperung der Prüfkörper waren IR-spektroskopisch im PE keine Vernetzerspaltprodukte mehr nachweisbar. Das ist die gleiche Zeit, bei der sich der Verlauf der Lebensdauerkurve im Bild 5 deutlich ändert. Daraus folgt, daß das Durchschlagverhalten der Prüfkörper bei 130 °C nach etwa 200 Stunden bis zu den größten Durchschlagzeiten (3000 Stunden) nur noch durch die spannungsstabilisierende Wirkung der Antioxidantien beeinflußt wird.

Inwieweit die Antioxidation auch nach 3000 Stunden bei 130 °C noch wirkt, wurde durch orientierende Messungen zur Bestimmung der Induktionszeit der thermischen Oxidation festgestellt. Die Induktionszeit ist die Zeit, nach der bei einer bestimmten Lagerungstemperatur die Oxidation des PE stark zunimmt (vgl. Bild 3). Innerhalb vertretbarer Alterungszeiten konnte jedoch weder bei 130 °C noch bei höherer Temperatur (150 °C) die Induktionszeit erreicht werden. Daher wurde das Anfangsstadium der Oxidation zwischen 150 °C und 180 °C erfaßt und dafür ein Carbonylindex von 0,8 in 1,2 mm Tiefe der 5 mm dicken PE-Isolierung festgelegt.

Die Alterungszeiten bis zum Erreichen dieses Kriteriums zwischen 180 °C und 150 °C genügen gut einer Arrhenius-Abhängigkeit und lassen eine Extrapolation auf 130 °C zu (Bild 6). Die Extrapolation der Geraden auf 130 °C ergibt eine Zeit von 4000 Stunden. Damit ist die Annahme gerechtfertigt, daß bei 130 °C mindestens bis zu dieser Zeit in der PE-Isolierung der Prüflinge eine zur Spannungsstabilisierung ausreichende Antioxidantkonzentration zur Verfügung steht.

4. Zusammenfassung

Die elektrische Lebensdauer des chemisch vernetzten Polyethylens ist in dem untersuchten Bereich (bis etwa 3000 Stunden) bei 130 °C nicht kleiner als bei 20 °C. Es wurde festgestellt, daß bis zu diesem Zeitpunkt die Antioxidantien thermische Alterungsreaktionen verhindern. Die thermischen Stabilisatoren beeinflussen damit bei höheren Temperaturen auch das elektrische Langzeitverhalten günstig.

Schlußfolgernd haben bei erhöhter Temperatur die Antioxidantien eine Doppelfunktion, indem sie einmal die thermische Alterung des PE verhindern und zum anderen gleichzeitig als elektrische Stabilisatoren wirken. Dadurch ermöglicht die thermische Lebensdauerkurve des Polyethylens, d.h. eine Aussage über die Wirkdauer der Antioxidantien, zugleich eine Aussage über das elektrische Langzeitverhalten der Isolierung bei höherer Temperatur.

Literatur

[1] *Motori, A.; Sandrolini, E.; Montanari, G. C.:* Chemical, physical and microstructural properties of thermally aged XLPE cable models. Proceedings second international conference on properties and applications of dielectric materials. China (1988), pp. 764–768
[2] *Li, C. S.:* Zur Lebensdauer von PE-Kabelisolierungen bei gleichzeitiger thermischer und elektrischer Belastung mit Wechselspannung. Dissertation A. Technische Universität Dresden 1989
[3] *Eberhardt, M.; Wagner, H.; Li, C. S.:* Zum Einfluß von thermischen Stabilisatoren auf die elektrische Lebensdauer von Polyethylen-Kabelisolierungen bei Betriebstemperatur. III. Int. Kabelkonferenz, Budapest, 18.–19. 10. 1989

EA 6122

Zum Verhalten von Vernetzerspaltprodukten in VPE-Kabelisolierungen bei Betriebstemperatur

Chr. Scharff, KDT, Großenhain; M. Eberhardt, KDT, Dresden

Die bei der chemischen Vernetzung von Polyethylen-Kabelisolierungen entstehenden sog. Vernetzerspaltprodukte können als elektrische Stabilisatoren wirken und zu einer Verlängerung der Lebensdauer von Polyethylen-Starkstromkabeln beitragen [1] [2]. Dies zeigt sich an Ergebnissen aus Konstantspannungsversuchen an unvernetzten und chemisch vernetzten 10-kV-Polyethylen-Starkstromkabeln (Bild 1). Die chemisch vernetzten Starkstromkabelprüflinge weisen im Vergleich zu den Kabeln mit unvernetzter PE-Isolierung wesentlich größere Durchschlagzeiten auf.

Im praktischen Betrieb von chemisch vernetzten PE-Starkstromkabeln, in dem Temperaturen bis zu 90 °C (Dauerbetrieb) bzw. 130 °C (Störlastbetrieb) [3] auftreten können, ist zu vermuten, daß die Vernetzerspaltprodukte aus der Kabelisolierung ausdiffundieren und damit ihre spannungsstabilisierende Wirkung abklingt.

Diese aus [4] und von eigenen Untersuchungen [5] her bekannte Erscheinung wurde bisher nur an plattenförmigen Modellprüfkörpern untersucht. Bei realen Kabelisolierungen liegen jedoch andere Bedingungen für die Desorption der Vernetzerspaltprodukte, insbesondere durch die Barrierewirkung der extrudierten Aderschirmung, vor. Somit besteht Unklarheit darüber, in welchem Maße bei realen Starkstromkabelisolierungen mit der Desorption der Vernetzerspaltprodukte zu rechnen ist, d.h., wie lange diese Stoffe in der Kabelisolierung bei Betriebstemperatur verbleiben. Diese Frage ist in Bezug auf die technische Nutzbarkeit der spannungsstabilisierenden Wirkung der Vernetzerspaltprodukte von besonderem Interesse.

Dazu wurden 1-m-Stücke des untersuchten chemisch vernetzten 10-kV-PE-Starkstromkabeltyps ohne elektrische Belastung bis zu einer Zeit von 4000 Stunden bei einer Temperatur von 90 °C gelagert, im Anschluß daran jeweils 10 Prüfkörper aus der Isolierung der betreffenden Kabelstücke herausgeschnitten und im Nadeltest deren Kanaleinsatzzeiten bei Raumtemperatur gemessen. Diese Kanaleinsatzzeiten sowie die auf der Basis der Weibullverteilung ermittelten Erwartungswerte der Kanaleinsatzzeiten in Abhängigkeit von der Zeitdauer der Temperaturlagerung (Temperung) sind im Bild 2 dargestellt. Es ist zu erkennen, daß mit zunehmender Zeitdauer der Temperung die Kanaleinsatzzeiten der Prüfkörper geringer werden. Als Ursache kommt nur die Desorption der Vernetzerspaltprodukte in Frage. Mit einer thermooxidativen Schädigung des thermisch stabilisierten VPE bei dieser Temperatur im untersuchten Zeitbereich ist, wie infrarotspektroskopische Untersuchungen belegen, nicht zu rechnen.

Nach einer Temperung von etwa 1000 bis 2000 Stunden ist keine weitere Abnahme der Kanaleinsatzzeiten zu verzeichnen. Nach dieser Zeitdauer ist also der Vorgang der Desorption der Vernetzerspaltprodukte aus der Isolierung der kompletten 10-kV-VPE-Starkstromkabel im wesentlichen abgeschlossen.

Es muß also damit gerechnet werden, daß während des praktischen Betriebes von chemisch vernetzten PE-Starkstromkabeln (ohne Metallmantel) die Vernetzerspaltprodukte aus der Isolierung während einer im Vergleich zur angestrebten Lebensdauer eines Kabels (von etwa 50 Jahren) kurzen Zeit ausdiffundieren. Ihre spannungsstabilisierende Wirkung ist somit technisch nicht nutzbar. Deshalb ist mit einer etwa gleichlangen Lebensdauer wie bei unvernetzten PE-Starkstromkabeln zu rechnen.

Zusammenfassung

Die Vernetzerspaltprodukte, die während der Vernetzungsreaktion in chemisch vernetztem Polyethylen entstehen, wirken wie Spannungsstabilisatoren. Während des praktischen Betriebes, d.h. bei höherer Temperatur, können sie aus der VPE-Kabelisolierung ausdiffundieren und deshalb die elektrische Lebensdauer nicht verlängern. Es muß davon ausgegangen werden, daß Lebensdaueruntersuchungen an fabrikneuen chemisch vernetzten PE-Starkstromkabelprüflingen, die bei Raumtemperatur vorgenommen werden, keine Schlußfolgerungen im Hinblick auf den praktischen Betrieb der betreffenden Kabel zulassen. Aus diesem Grunde sollten bei VPE-Kabeln zur Erzielung praxisrelevanter Ergebnisse Untersuchungen zur Lebensdauer erst nach dem Entfernen der Vernetzerspaltprodukte aus der Isolierung der zu prüfenden Kabel durch Temperaturlagerung vorgenommen werden.

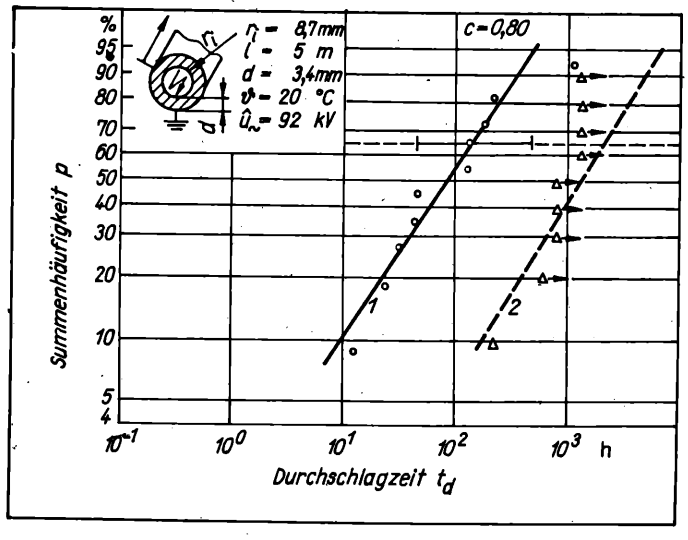


Bild 1. Durchschlagzeiten von 10-kV-Starkstromkabeln mit einer Isolierung aus unvernetztem bzw. chemisch vernetztem Polyethylen (ϑ = 20 °C)
1 unvernetzt
2 chemisch vernetzt

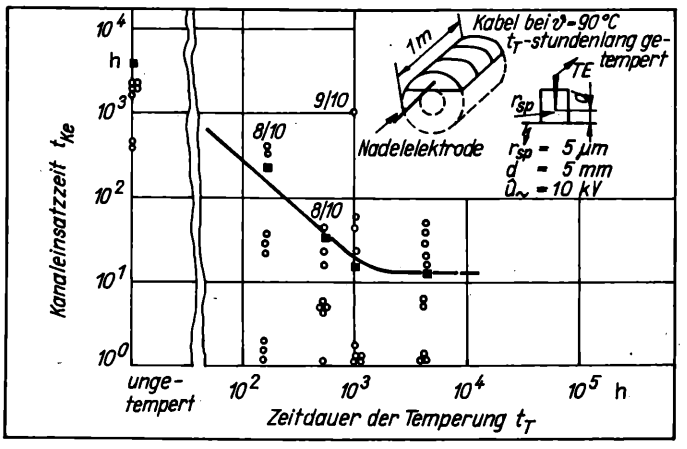


Bild 2. Kanaleinsatzzeiten bei 20 °C von Prüfkörpern aus der Isolierung von chemisch vernetzten 10-kV-Starkstromkabeln in Abhängigkeit von der Zeitdauer der Temperung bei 90 °C
o Einzelmeßwerte der Kanaleinsatzzeiten
▌ Erwartungswerte der Kanaleinsatzzeiten (t_{Ke63})

Literatur

[1] *Scharff, C.; Eberhardt, M.:* Elektrisches Langzeitverhalten von strahlen- und chemisch vernetzten Polyethylenisolierungen für Mittelspannungskabel bei Raumtemperatur. ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 11, S. 423–426
[2] *Eberhardt, M.; Scharff, C.:* Zum Einfluß der Vernetzung auf den Durchschlagprozeß im Polyethylen. Acta Polymerica 38 (1987) 6, S. 385–388
[3] TGL 200-1750/02 Starkstromkabel; Allgemeine technische Forderungen. 1. Änderung, Ausgabe Juli 1985
[4] *Asmuth, P.:* Das Durchschlagverhalten von vernetztem Polyethylen nach unterschiedlicher Vorbelastung. Dissertation. Technische Universität Hannover 1982
[5] *Scharff, C.:* Zum Einfluß von Vernetzung und erhöhter Temperatur auf die Lebensdauer von Polyethylenisolierungen bei Wechselspannungsbelastung. Dissertation. Technische Universität Dresden 1988

EA 6123

Dr.-Ing. *Christian Scharff* ist Spezialist für Starkstromkabel und Fertigungsprozesse im VEB Kabelwerk Meißen; Dr. sc. techn. *Martin Eberhardt* ist Dozent am Wissenschaftsbereich Hochspannungstechnik der Technischen Universität Dresden.

Wirkung zyklisch-thermischer Belastung bis 130 °C auf die VPE-Kabelisolierung

Chr. Scharff, KDT, Großenhain; M. Eberhardt, KDT, Dresden

Über die Höhe der maximal zulässigen Betriebstemperatur für VPE-Starkstromkabel im Störlastbetrieb besteht international im Gegensatz zur Dauerbetriebstemperatur sowie zur maximalen Temperatur im Kurzschluß keine einheitliche Meinung (Tafel 1). Die unterschiedlichen Auffassungen gründen sich im wesentlichen auf thermomechanische Untersuchungen.

Thermisch-elektrische Untersuchungen, d.h. Untersuchungen zu den Auswirkungen des Störlastbetriebs auf das elektrische Langzeitverhalten des Kabelisolierstoffs, fanden dabei bisher weniger Beachtung.

Um diesbzgl. weitere Erkenntnisse zu erhalten, wurden 10 chemisch vernetzte Starkstromkabelprüflinge (je 5 m lang) durch Stromfluß im Innenleiter ($I = 510$ A) in Anlehnung an praktische Betriebsverhältnisse in mehreren Zyklen (jeweils 6 Std. Aufheizen, 30 Std. 130 °C, 12 Std. Abkühlen; aufsummierte Zeit der thermischen Belastung: 1000 Stunden) thermisch belastet.

Durch die zyklisch-thermische Belastung der VPE-Starkstromkabelprüflinge wurden gewisse Veränderungen einerseits des Isolierstoffs (gelblich-bräunliche Verfärbung des ursprünglich milchigweißen VPE) und andererseits der Kabelisolierung der Prüflinge (Deformation der Isolierung besonders an der Oberfläche) hervorgerufen. Wie die genannten Veränderungen zu bewerten sind, soll im folgenden untersucht werden.

1. Auswirkungen auf den Isolierstoff

Bei der Beurteilung der Auswirkungen der zyklisch-thermischen Belastung auf den Isolierstoff waren mit Hilfe geeigneter Stoffuntersuchungen drei Fragen zu klären:

1. Ist mit einem veränderten elektrischen Langzeitverhalten des VPE nach dieser Belastung zu rechnen?
2. Inwieweit erfolgte eine thermooxidative Schädigung des VPE?
3. Sind sonstige chemische Veränderungen des Isolierstoffes festzustellen?

Zu 1. Zur Beurteilung des elektrischen Langzeitverhaltens des VPE nach der zyklisch-thermischen Belastung wurden aus der Isolierung eines Starkstromkabelprüflings VPE-Quader als Spitze-Platte-Modellprüfkörper herausgeschnitten. Von diesen wurden die Kanaleinsatzzeiten bei Raumtemperatur ermittelt und ausgewertet (Bild 1). Es zeigt sich, daß die durch die spannungsstabilisierende Wirkung der Vernetzerspaltprodukte sehr hohen Kanaleinsatzzeiten der Prüfkörper aus frisch vernetztem Kabel (Kurve 1) durch die zyklisch-thermische Belastung bei 130 °C verringert werden (Kurve 2). Ursache ist die bereits beschriebene Desorption dieser Produkte. Dadurch werden Kanaleinsatzzeiten verursacht, die nur noch unwesentlich größer sind als die unvernetzter PE-Prüfkörper (Kurve 3).

Zu 2. Zur Klärung der Frage hinsichtlich einer thermooxidativen Schädigung des VPE wurden infrarotspektroskopische Untersuchungen vorgenommen[1]). Dabei wurde zur Beurteilung die für thermisch oxidiertes PE charakteristische Absorptionsbande bei $\omega = 1715\ cm^{-1}$, welche auf die bei der thermischen Alterung im VPE gebildeten Carbonylgruppen zurückzuführen ist [1], herangezogen. Aus dem IR-Spektrum einer Probe aus der Kabelisolierung nach Abschluß der zyklisch-thermischen Belastung (Bild 2) wird trotz der in unmittelbarer Nähe liegenden Absorption bei $\omega = 1745\ cm^{-1}$ ersichtlich, daß die genannte für thermisch oxidiertes PE charakteristisch Absorption bei $\omega = 1715\ cm^{-1}$ nicht oder nur äußerst gering ausgeprägt ist. Schlußfolgernd daraus ist infolge der 1000 stündigen zyklisch-thermischen Belastung bei 130 °C offensichtlich durch die oxidationsinhibierende Wirkung der enthaltenen Antioxidantien sowie durch den erschwerten Zutritt von Sauerstoff wegen der Konstruktionselemente der Starkstromkabel (PVC-Mantel, Polsterschichten, Aderschirmung) nur eine unwesentlich geringe oxidative Schädigung des VPE hervorgerufen worden.

Zu 3. Im Zusammenhang mit der Beantwortung der Frage nach sonstigen chemischen Veränderungen des Isolierstoffs während der thermischen Belastung gehen aus dem IR-Spektrum einige charakteristische Absorptionen hervor, die beim thermisch unbelasteten Material nicht festzustellen sind. Aus dem Spektrum der thermisch belasteten Probe ist z.B. zu entnehmen, daß bei $\omega = 1745\ cm^{-1}$ eine ausgeprägte Absorption vorhanden ist. Diese ist typisch für das Copolymere aus Ethylen und Vinylacetat (EVA) [2], das als Leiterglättungs- und Aderschirmungsmaterial zur Anwendung kommt. Außerdem weist selbige darauf hin, daß während der thermischen Belastung Bestandteile der Leiterglättung bzw. Aderschirmung in den Isolierstoff eingewandert sind und dort offensichtlich die farbliche Veränderung des VPE verursacht haben.

Tafel 1. Zulässige Leitergrenztemperaturen für VPE-Starkstromkabel

Land	Standard	Leitergrenztemperatur in °C bei Betriebsart		
		Dauerlast	Störlast	Kurzschluß
—	IEC-Empfehlung 502 — 3	90	—	250
DDR	TGL 200-1750/02	90	130 (100 h/a)	250
BRD	VDE 0298/2	90	—	250
USA	AEIC C5-81	90	130 (36 h/a bzw. 72 h/a)	250
Japan	JEC-208-1980	90	105	250
Frankreich	HN 33 S 23	90	120 (3 h je Störung / 24 h/a)	250
Großbritannien	BS 5468	90	—	250

2. Auswirkungen auf die Kabelisolierung

Die festgestellten Deformationen treten — wie optische Untersuchungen an einer Vielzahl von Mikrotomschnitten belegen — ausschließlich an der Grenzschicht Isolierung-Aderschirmung auf. Dabei betrug die Tiefe der stärksten festgestellten Deformation 125 µm bei einer Breite von 300 µm. Deformationen an der Grenzschicht Isolierung-Leiterglättung wurden nicht beobachtet. Aus vorgenommenen Feldberechnungen geht hervor, daß die erkennbaren Deformationen an der Oberfläche der Isolierung nur geringfügige Erhöhungen der Feldstärke in der Kabelisolierung bewirken. So beeinflussen demnach die Veränderungen der Feldstärkeverteilung in der Isolierung den Durchschlagprozeß nur unwesentlich und sind damit unkritisch.

Weiterhin kann davon ausgegangen werden, daß kritische Hohlräume (z.B. Abhebungen der Feldbegrenzungsschicht) durch die festgestellten Deformationen offensichtlich nicht entstanden sind. Das belegen TE-Messungen an den Starkstromkabelprüflingen bei Spannungen bis $9 \cdot U_0$. Aus den genannten Gründen ist mit Auswirkungen der festgestellten Deformationen auf die Lebensdauer der untersuchten VPE-Kabelisolierungen nicht zu rechnen.

Als Folge der zyklisch-thermischen Belastung ist eine gewisse Verringerung der Durchschlagzeiten der Kabelprüflinge zu verzeichnen (Bild 3). Ersichtlich wird das aus einem Vergleich der Verteilungsfunktionen der Durchschlagzeiten bei 20 °C von Kabelprüflingen vor (Kurve 1) und nach der zyklisch-thermischen Belastung (Kurve 2). Diese Verringerung der Durchschlagzeiten wird offensichtlich weniger durch die festgestellten Deformationen der Kabelisolierung, sondern im wesentlichen mehr durch die Veränderungen des Isolierstoffs VPE nach der thermischen Belastung verursacht, d.h. durch das Ausdiffundieren der Vernetzerspaltprodukte [3]. Ein Vergleich mit den Durchschlagzeiten unvernetzter PE-Kabelprüflinge (Kurve 3) zeigt jedoch, daß die VPE-Starkstromkabel trotz

Dr.-Ing. *Christian Scharff* ist Spezialist für Starkstromkabel und Fertigungsprozesse im VEB Kabelwerk Meißen; Dr. sc. techn. *Martin Eberhardt* ist Dozent am Wissenschaftsbereich Hochspannungstechnik der Technischen Universität Dresden.

[1]) Die Infrarotspektroskopischen Messungen wurden dankenswerterweise von Dr. *Wagner* im ZfW Dresden vorgenommen.

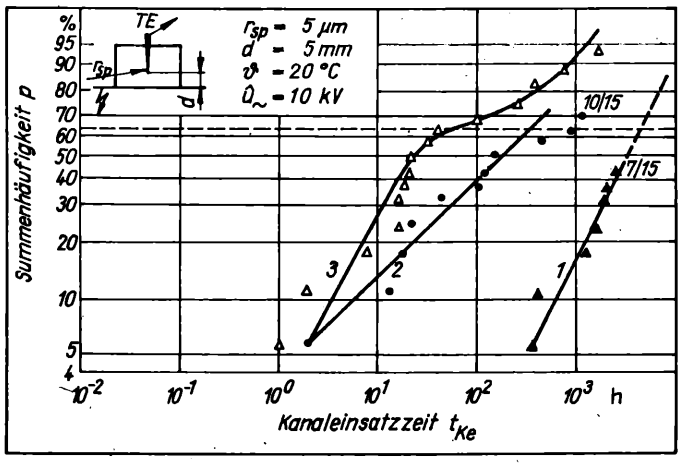


Bild 1. Kanaleinsatzzeiten von Spitze-Platte-Modellprüfkörpern aus VPE (chemisch vernetzt) vor und nach zyklisch-thermischer Belastung
PE/VPE (mit Antioxidant): *1* chemisch vernetzt; *2* chemisch vernetzt nach zyklisch-thermischer Belastung (1000 Std. 130 °C); *3* unvernetzt

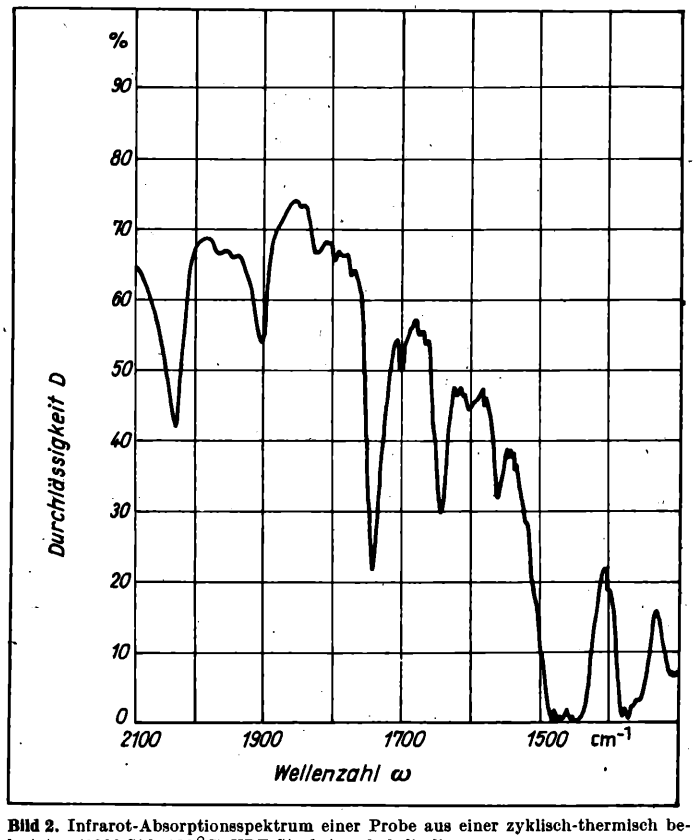
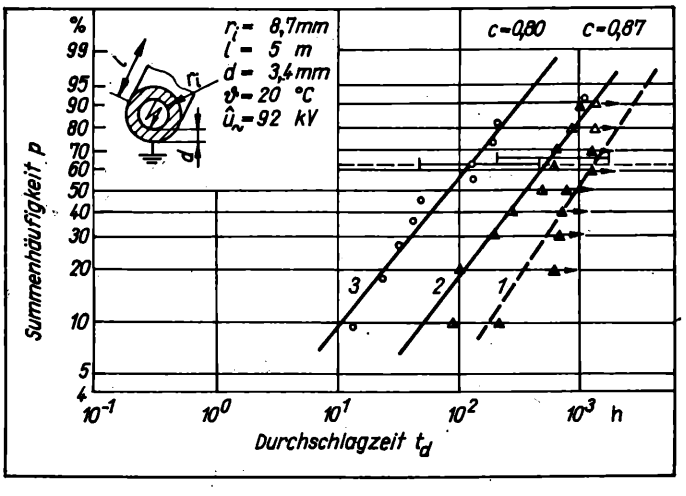


Bild 2. Infrarot-Absorptionsspektrum einer Probe aus einer zyklisch-thermisch belasteten (1000 Std. 130 °C) VPE-Starkstromkabelisolierung

Bild 3. Einfluß zyklisch-thermischer Belastung auf die Durchschlagzeiten chemisch vernetzter 10-kV-VPE-Starkstromkabel
PE/VPE-Kabel: *1* chemisch vernetzt neu; *2* chemisch vernetzt nach zyklisch-thermischer Belastung (1000 Std. 130 °C); *3* unvernetzt neu



Anwendung der TE-Sondenmeßtechnik im Rahmen der Qualitätskontrolle an PE/VPE-Mittelspannungskabeln

M. Hornschuh, KDT, Meißen; E. Lemke, KDT, Dresden

Mitteilung aus dem VEB Kabelwerk Meißen im Kombinat VEB Kabelwerk Oberspree „Wilhelm Pieck" Berlin

Verwendete Formelzeichen und Indizes

A_I	Anzeige des Meßgerätes bei Einspeisung von Kalibrierimpulsen
A_t	Anzeige des Meßgerätes beim Impulsabstand t eines Doppelimpulses
$A_{t=100}$	Anzeige des Meßgerätes bei einem Impulsabstand von $t = 100$ µs eines Doppelimpulses
k_T	Maßstabsfaktor des Meßgerätes
k_{I1}	Maßstabsfaktor des Meßgerätes bei Kalibrierung mit PET 2
k_{I2}	Maßstabsfaktor des Meßgerätes bei Kalibrierung mit Kalibrator M 4202
Δk_I	relative Abweichung der Maßstabsfaktoren
q_0	Kalibrierladung
q_i	scheinbare Ladung
$q_{i\,max}$	maximale scheinbare Ladung
t	Impulsabstand eines Doppelimpulses
$U_{p\,eff}$	Effektivwert der 50-Hz-Prüfspannung

1. Problematik

Bekanntermaßen stellt die Teilentladungsmessung (TE-Messung) ein sensibles Verfahren zur Beurteilung der Qualität von plastisolierten Mittel- und Hochspannungskabeln dar [1]. Sie wird deshalb von allen Kabelherstellern unter Verwendung standardisierter Meßmethoden und Meßtechnik [2] [3] als Stückprüfung an den Fertigungslängen durchgeführt. Grundvoraussetzung dafür ist eine hohe Meßempfindlichkeit, d.h. ein hohes Nutz-Störsignal-Verhältnis, da die zu beurteilenden TE im Bereich von wenigen Pikocoulomb (pC) liegen. Weitere Anforderungen an das TE-Meßgerät sind:

Dipl.-Ing. *Michael Hornschuh* ist Entwicklungsingenieur im VEB Kabelwerk Meißen; Prof. Dr. sc. techn. *Eberhardt Lemke* ist Dozent am Wissenschaftsbereich Hochspannungstechnik der Technischen Universität Dresden.

der zyklisch-thermischen Belastung bei 130 °C bez. ihrer Lebensdauer nicht schlechter als unvernetzte PE-Kabel im Neuzustand sind.

3. Zusammenfassung

Bei der im Störlastbetrieb bei 130 °C auftretenden thermischen Beanspruchung ist mit Veränderungen des Isolierstoffs sowie mit Deformationen der Isolierung zu rechnen. Jedoch erscheinen diese, wie Lebensdaueruntersuchungen bei 20 °C ergaben, bezüglich der Zuverlässigkeit der Kabel als unbedenklich.

Literatur

[1] *Häußler, L.; Langner, H.; Wagner, H.:* Thermooxidative Alterung von LDPE im unvernetzten und strahlenvernetzten Zustand. 7. Arbeitstagung des Kreises Polymerelektronik. Biesenthal, 31. 10. – 3. 11. 1983

[2] *Hummel, D. O.; Scholl, F.:* Atlas der Polymer- und Kunststoffanalyse. 2. Auflage, Band 1. München, Wien: Carl Hanser Verlag; New York: Verlag Chemie Weinheim

[3] *Scharff, C.; Eberhardt, M.:* Zum Verhalten von Vernetzerspaltprodukten in VPE-Kabelisolierungen bei Betriebstemperatur. ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4. S. 133

EA 6124

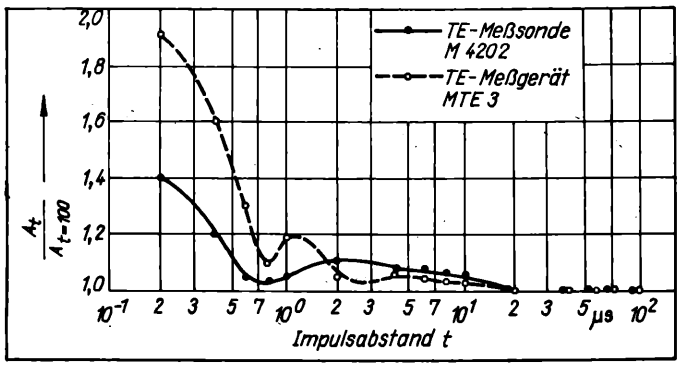


Bild 1. Doppelimpulsdiagramme des Meßkreises mit TE-Sonde M 4202 sowie mit MTE 3

— Anschlußmöglichkeiten peripherer Auswertetechnik (u.a. Oszilloskop, Datenspeicher, Fehlerortungsgerät)
— hohes zeitliches Auflösevermögen für Impulsfolgen bis zu Impulsabständen von weniger als 100 ns zur möglichst punktgenauen Ortung von TE-Fehlern.

In den Kabelprüffeldern der DDR wird vorwiegend das TE-Meßsystem MSTE 3[1]) [4] eingesetzt, das aufgrund des breitbandigen Meßprinzips wesentliche Vorteile bei der TE-Messung an Kabeln aufweist, da neben einem günstigen Nutz-Störsignal-Verhältnis auch die Fehlerortung unmittelbar mit der TE-Qualitätskontrolle kombiniert werden kann [5]. Seit einem Jahr wird vom VEB Robotron Meßelektronik Dresden eine TE-Meßsonde produziert, die gemeinsam mit der TU Dresden entwickelt wurde [6]. Es ist daher naheliegend, diese neuartige Lösung hinsichtlich ihrer Eignung zur Qualitätskontrolle an plastisolierten Kabeln zu testen. Dazu wurden im VEB Kabelwerk Meißen erste Untersuchungen durchgeführt. Wesentliche Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt.

2. Einsatzbedingungen

Die Untersuchungen wurden sowohl im Entwicklungslabor, als auch vorwiegend im TE-Prüffeld des VEB Kabelwerk Meißen durchgeführt.
Hauptbestandteile des TE-Prüffeldes sind:

— ungeschirmter Anlagenraum (mit Niederspannungseinspeisung, Netzfiltern Regeltransformator, Hochspannungserzeuger, Hochspannungsmeßsystem)
— vollständig geschirmte TE-Meßkabine (mit Kabelprüfendverschlüssen, Koppelkondensator, Meßimpedanz)
— Personalraum mit der Steuer-, Meß- und Auswertetechnik.

Der TE-Meßkreis genügt den Forderungen der TGL 20625 (IEC 270). Die Übertragung des Meßsignals von der Meßimpedanz zum Meßgerät erfolgt über HF-Meßkabel (Wellenwiderstand 50 Ω) und BNC-Anschlußtechnik.

3. Einsatz der TE-Meßsonde im Standardmeßkreis

Die TE-Meßsonde M 4202 wurde im Personalraum mit den Eingängen Meßelektrode (ME) und Gehäuseelektrode (GE) an das Meßkabel mit 50 Ω Abschlußwiderstand angeschlossen.

3.1. Doppelimpulsdiagramm

Bekanntlich weist die TE-Messung an plastisolierten Kabeln einige Besonderheiten auf, da das Kabel im HF-Bereich nicht mehr als konzentrierte Kapazität, sondern als Wellenleiter wirkt. Demzufolge rufen TE-Impulse Wanderwellenvorgänge mit den bekannten Reflexions- und Überlagerungserscheinungen hervor [7]. Je nach Form der Impulsantwort des Meßsystems kann es bei zwei mit geringem zeitlichem Abstand einlaufenden TE-Impulsen zu positiven oder negativen Überlagerungen der beiden Antwortschwingungen, d.h. zu einer Erhöhung oder Verringerung der Anzeige des Meßgerätes, kommen. Zur Beurteilung des Überlagerungsverhaltens eines TE-Meßsystems wurde international ein Meßverfahren standardisiert [3], bei dem ein definierter Doppelimpuls mit veränderlichem Impulsabstand $t = 0{,}2 \cdots 100$ µs in das Meßsystem eingespeist und die Anzeige $A_t = f(t)$ registriert wird. Die Darstellung der Funktion $A_t/A_{t=100} = f(t)$ läßt die Bestimmung der Bereiche positiver ($A_t/A_{t=100} > 1$) und negativer ($A_t/A_{t=100} < 1$) Überlagerung zu. Zulässig ist dabei ein negativer Überlagerungsfehler von maximal 10% [3]. Bei positiver Überlagerung liegt das Meßergebnis auf der technisch sicheren Seite. Die aufgenommenen Doppelimpulsdiagramme des MSTE 3 und der TE-Meßsonde M 4202 weisen keine Bereiche negativer Überlagerung auf (Bild 1). Damit kann die TE-Meßsonde in Verbindung mit dem im VEB Kabelwerk Meißen aufgebauten TE-Meßkreis uneingeschränkt für die TE-Messung an langen Kabeln genutzt werden, ohne daß Fehlbewertungen im Sinne eines Absenkens des TE-Pegels zu erwarten sind.

3.2. TE-Messung am Kabel

3.2.1. Kalibrierung

Kalibriert wurde ausschließlich im „klassischen" Sinne, d.h. Anschluß des Kalibrators an die Klemmen des Prüflings. Vergleichsweise wurde mit dem PET 2 (externer Kalibrator des MSTE 3) und mit dem Kalibrator M 4202 kalibriert. Entsprechend TGL 20625 (IEC 270) sollte zuerst die Bestimmung des Maßstabsfaktors k_I für das Meßsystem ohne angeschlossenen Prüfling erfolgen.

$$k_I = \frac{q_0}{A_I} \tag{1}$$

Im Gegensatz zum MTE 3 wurden mit der TE-Meßsonde M 4202 in den einzelnen Meßbereichen unterschiedliche Maßstabsfaktoren bei Verwendung verschiedener Kalibratoren festgestellt, wobei die Kalibrierung der TE-Meßsonde mit dem Kalibrator M 4202 höhere Werte ergab (Bild 2). Die maximale relative Abweichung Δk_I

$$\Delta k_I = \frac{k_{I2} - k_{I1}}{k_{I2}} \times 100\,\% \tag{2}$$

lag bei 20%. Ursache dafür ist offensichtlich die höhere untere Grenzfrequenz der TE-Sonde bei der Signalverarbeitung und damit eine stärker ausgeprägte Abhängigkeit von der Form der Kalibrierimpulse, die bei beiden Kalibratoren unterschiedlich ist. Die anschließende Bestimmung des Maßstabsfaktors k_c für den gesamten Prüfkreis mit angeschlossenem Prüfling führte zur gleichen Erkenntnis. Die bisher vorliegenden Ergebnisse von Vergleichsmessungen zeigen, daß bei der TE-Sonde als Einfachmeßgerät anstelle des MTE 3 ein maximaler Meßfehler von etwa 20 % zu erwarten ist. Aufgrund des stochastischen Charakters von TE-Signalen und den daraus resultierenden starken Amplitudenschwankungen ist dieser Meßfehler für orientierende Messungen als unkritisch zu bewerten. Bei der Stückprüfung an plastisolierten Kabeln dagegen ist der unterschiedlichen Bewertung von Kalibrierimpulsen Beachtung zu schenken, da hierbei standardisierte Grenzwerte der scheinbaren Ladung q_i als Qualitätskriterium beurteilt werden. Im Rahmen zukünftiger Weiterentwicklungen der TE-Sonde sollten deshalb Möglichkeiten zur Verringerung der unteren Grenzfrequenz bezüglich der TE-Signalverarbeitung geprüft werden.

3.2.2. Hochspannungstest

Mit der TE-Sonde wurde an mehreren Fertigungslängen PE-isolierter Kabel 10 — 30 kV TE-Messungen durchgeführt.
Die Meßempfindlichkeit betrug etwa 2 pC bei einem Grundstörpegel von 1 pC. Die Ergebnisse einer TE-Messung an einem Kabel des Typs NA2YHCaY 1 × 120 re 12/20 kV, TGL 200-1750 der Länge von 1012 m gibt Tafel 1 wieder. Im Zusammenhang mit der bei der Kalibrierung gewonnenen Erkenntnis der unterschiedlichen Bewertung von Kalibrierimpulsen durch die Sonde läßt sich aus den Meßergebnissen schlußfolgern, daß die Kalibrierimpulse des PET 2 hinsichtlich ihres Frequenzspektrums offensichtlich den im Kabel auftretenden originalen TE-Impulsen besser entsprechen. Da aber bei Verwendung des Kalibrators M 4202 höhere Werte gemessen wurden, bringt die Nutzung dieses Kalibrators keine Nachteile, d.h., die Meßergebnisse liegen auf der technisch sicheren Seite.

3.4. TE-Fehlerortung

3.4.1. Auflösevermögen

Die Ortung von TE-Fehlern nach der Laufzeitmethode ist ein bekanntes Verfahren [8] [9], das seit Jahren auch im Kabelwerk Meißen praktisch genutzt wird. Das Auflösevermögen des MTE 3 läßt dabei eine minimal mögliche Entfernung des Fehlerortes zum detektorfernen Ende von etwa 10 m zu.
Die TE-Meßsonde M 4202 bietet über den optoelektronischen Ausgang „ungeformte Impulse" ebenfalls die Möglichkeit zur Auskopp-

[1]) Hersteller: VEB TuR Dresden

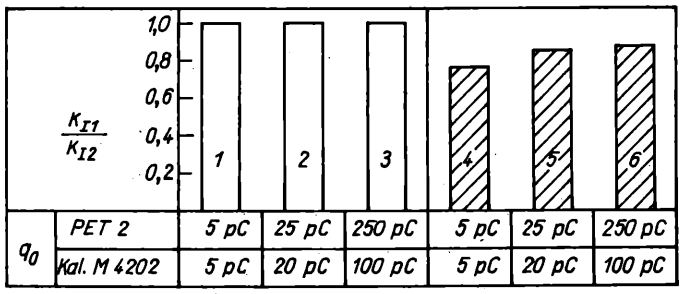


Bild 2. Verhältnis der Maßstabsfaktoren des Meßgerätes bei Verwendung verschiedener Kalibratoren
k_{I1} Maßstabsfaktor der Meßgeräte bei Kalibrierung mit PET 2;
k_{I2} Maßstabsfaktor der Meßgeräte bei Kalibrierung mit Kalibrator M 4202
I Dämpfung 10 dB } MTE 3
II Dämpfung 30 dB } MTE 3
III Dämpfung 50 dB } MTE 3
IV Verstärkung 1 – 5 } M 4202
(erste Ziffer: Schalterstellung der Verstärkerumschaltung; zweite Ziffer: Stellung des Feineinstellers der Verstärkung) } M 4202
V Verstärkung 1 – 2 } M 4202
VI Verstärkung 1 – 1 } M 4202

Tafel 1. Gemessene TE-Werte an einem Kabel NA2YHCaY 1 × 120 re 12/20 kV; 1012 m

	TE-Meßsonde		MTE 3
Prüfspannung $u_{p\,eff}$ [kV]	Maximale scheinbare Ladung		
	$q_{i\,max}$ [pC] Bei Kalibrierung mit PET 2	M 4202	$q_{i\,max}$ [pC]
6,4	15	20	15
8,1	50	56	50

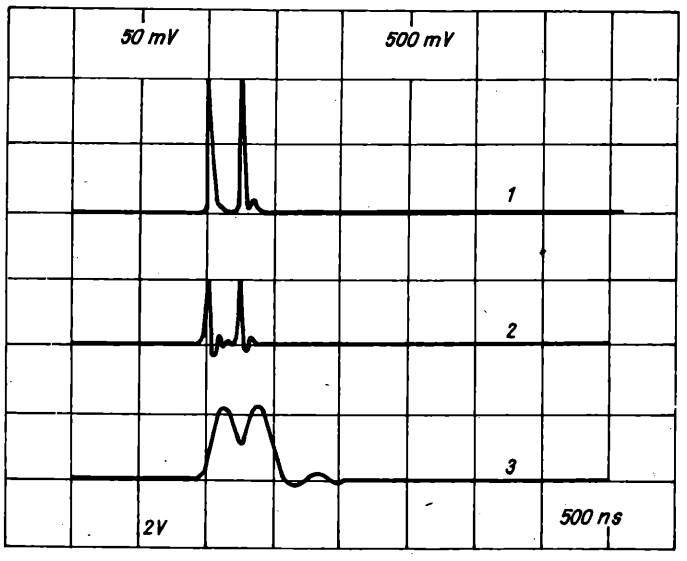


Bild 3. Auflösevermögen der TE-Meßgeräte MTE 3 und M 4202
1 Eingangsimpulse, Meßimpedanz; *2* Ausgangsimpulse, MTE 3; *3* Ausgangsimpulse, M 4202

lung sehr dicht aufeinanderfolgender Impulse im ns-Bereich, wobei das Auflösevermögen durch Einspeisung von Doppelimpulsen an der Meßimpedanz und Oszillografieren des Ausgangssignals beurteilt werden kann. Bild 3 zeigt, daß das Auflösevermögen des Meßsystems M 4202 gegenüber dem des MTE 3 auf etwa 250 ns begrenzt ist (bei einer Impulsbreite der Eingangsimpulse von etwa 100 ns), das entspricht einer minimal möglichen Entfernung des Fehlerortes zum detektorfernen Ende von etwa 20 m.
Als hauptsächlichste Ursache wird die starke Verformung der Impulse durch die optoelektronische Übertragungsstrecke angesehen. Im Labortest wurde dagegen an einer modifizierten Sonde bei Direktauskopplung der originalen TE-Impulse ein Auflösevermögen von 60 ns erreicht, so daß bei Nutzung dieser Kopplung das Auflösevermögen auf weniger als 10 m verbessert werden kann.
Bei der Weiterentwicklung der TE-Sonde sollte überprüft werden, ob durch Verbesserung der Parameter der Lichtwellenleiter-Übertragung diese Auflösegrenze ebenfalls erreichbar ist.

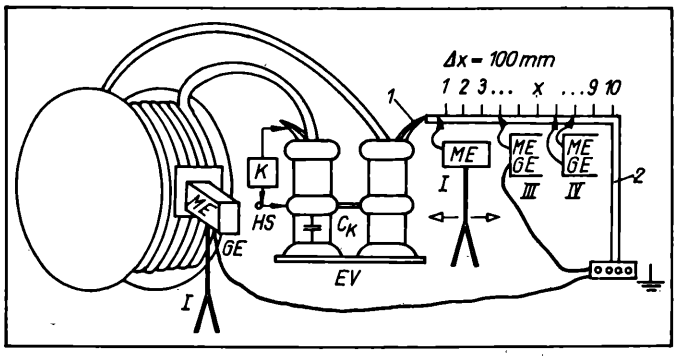


Bild 4. Prinzipskizze zur TE-Sondenmessung bei freier Feldkopplung und galvanischer Ankopplung
HS Hochspannungszuführung; *K* Kalibrator; C_K Koppelkondensator; *EV* Endverschlußsystem; *ME/GE* Meßelektrode/Gehäuseelektrode der Sonde; *1* Schirmdrähte des Prüflings, *2* Erdzuleitung Cu-Band 30 × 0,15 mm; *I* potentialbezogene freie Feldkopplung mit scheibenförmiger Zusatzantenne; *II* potentialfreie einpolige galvanische Kopplung; *III* potentialbezogene einpolige galvanische Kopplung; *IV* zweipolige galvanische Kopplung

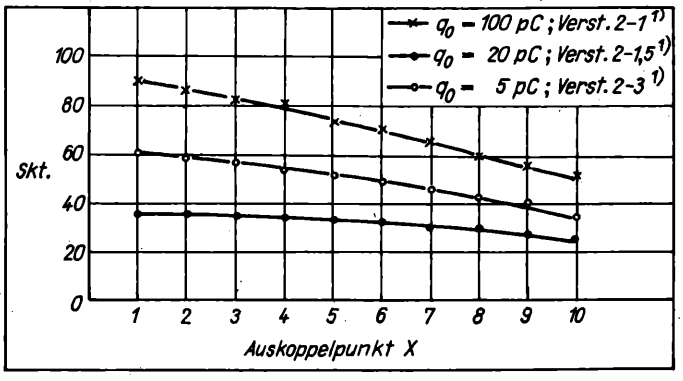


Bild 5. Empfindlichkeit bei Einspeisung von Kalibrierimpulsen bei potentialbezogener einpoliger galvanischer Kopplung an die Endzuleitung
[1]) Erste Ziffer: Schalterstellung der Verstärkerumschaltung
Zweite Ziffer: Stellung des Feineinstellers der Verstärkung

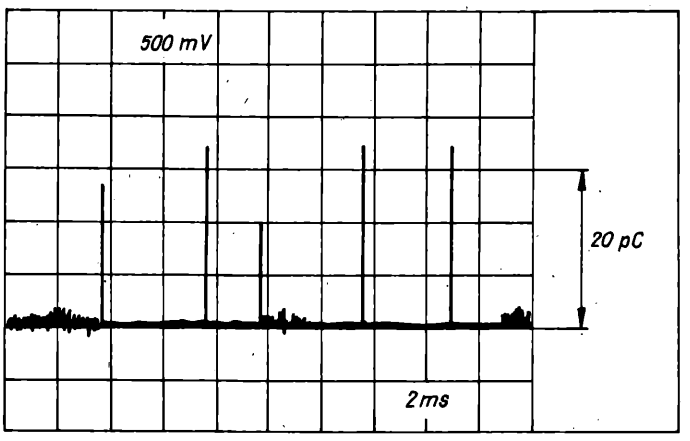


Bild 6. TE-Messung an einem Kabel mit der Sonde M 4202 bei potentialbezogener freier Feldkopplung

3.4.2. TE-Fehlerortung am Kabel

An einer TE-behafteten Kabellänge (s. Tafel 1) erfolgte die Bestimmung des Fehlerortes. Vergleichsweise wurde wieder mit beiden Meßsystemen gemessen:

— MTE 3 mit Kabelfehlerortungsgerät KFO 1[2]): Fehlerort 393 m vom detektorfernen Ende
— M 4202 mit Fehlerortungsgerät FOG 80050[3]): Fehlerort 397 m vom detektorfernen Ende.

Somit kann eingeschätzt werden, daß eine Fehlerortung mit der TE-Sonde mit ausreichender Genauigkeit möglich ist, wenn sich die Fehlerstelle mehr als 20 m vom detektorfernen Ende entfernt befindet.

[2]) Hersteller: VEB TuR Dresden
[3]) Hersteller: VEB Robotron Meßelektronik Dresden

Tafel 2
Nachweisgrenzen bzw. Ansprechschwellen der TE-Sonde bei verschiedenen Ankoppelarten

Ankoppelarten			Registrierter Grundstörpegel (pC)	Nachweisgrenze bzw. Ansprechschwelle (pC)
Galvanisch an Erdleitung	potentialfrei einpolig		≦ 2	20
	potentialbezogen einpolig		≦ 2	< 5
	zweipolig		– [1]	100
Freie Feldkopplung	Kabelenden in Luft	potentialfrei	– [1]	2000
		potentialbezogen	– [1]	etwa 500
		potentialbezogen; mit Zusatzantenne	etwa 20	etwa 50
		Induktivität in der Erdzuleitung; mit Zusatzantenne	etwa 20	etwa 20
	Kabelenden im Ölendverschluß	potentialbezogen; mit Zusatzantenne	≦ 2	< 5

[1]) Aufgrund der hohen Ansprechschwelle der Sonde kein Grundstörpegel nachweisbar

4. Nutzung der TE-Meßsonde außerhalb des TE-Standardmeßkreises

Der entscheidende Vorteil der TE-Sonde ist bekanntlich die Möglichkeit, TE-Signale durch freie Feldkopplung oder auch durch galvanische Ankopplung an geerdete Prüflingsteile zu erfassen, ohne daß Koppelkondensator und Meßimpedanz benötigt werden.
Im Rahmen der bisher im VEB Kabelwerk Meißen durchgeführten Messungen wurden beide Möglichkeiten mit verschiedenen Variationen der Prüfanordnung hinsichtlich ihrer Eignung und erreichbaren Empfindlichkeit untersucht.

4.1. Versuchsbedingungen

4.1.1. Freie Feldkopplung

Bei der freien Feldkopplung wird das elektromagnetische Strahlungsfeld der TE-Signale erfaßt. Um möglichst hohe Empfindlichkeiten zu erreichen, muß die Sonde so nahe wie möglich an das Prüfobjekt herangebracht werden. An der Kabeltrommel wird die TE-Sonde mit dem Meßfenster unmittelbar an die Kabeloberfläche angelegt (Bild 4). Das Aufstecken einer scheibenförmigen Zusatzantenne erhöht dabei die Empfindlichkeit beträchtlich.
Eine solche Zusatzantenne ist leicht selbst herstellbar. Aus 2 bis 3 mm starkem Aluminiumblech wird eine quadratische (oder auch runde) Scheibe in der Größenordnung von 300 × 300 mm² gefertigt, in deren Mitte ein Steckkontakt ⌀ 4 mm angebracht wird. Bei der freien Feldkopplung wurden folgende Varianten getestet:

— mit und ohne scheibenförmiger Zusatzantenne
— potentialfreie und potentialbezogene Feldkopplung
— Zwischenschalten von Induktivitäten in die Erdzuleitung zur Sonde
— Kabelenden frei in Luft; Feldsteuerung an den Enden mit Leitlack
— Kabelenden im ölgefüllten Prüfendverschluß mit integrierter Koppelkapazität
— örtliche Verschiebung der Sonde entlang der Kabeloberfläche.

4.1.2. Galvanische Ankopplung an die Erdzuleitung

Die Ankopplung erfolgte an die Erdzuleitung zu den Schirmdrähten des Prüflings sowohl ein- als auch zweipolig. Um die Abhängigkeit der Meßergebnisse von der Lage des Auskoppelpunktes zu registrieren, wurde die Erdzuleitung in 10 Abschnitte zu je 10 cm unterteilt (Bild 4). Im folgenden werden die einzelnen Auskoppelpunkte mit $X = 1 \cdots 10$ bezeichnet. Die Sonde wurde längs der Erdzuleitung verschoben. Die Signalauskopplung erfolgte mit einer 10 cm langen Laborleitung, die am Eingang ME der Sonde angeschlossen war. Bei der potentialbezogenen Kopplung wurde die Gehäuseelektrode GE der Sonde mit dem zentralen Erdpunkt mittels Laborleitung verbunden. Für die zweipolige Kopplung wurden die Eingänge ME und GE der Sonde mit jeweils zwei benachbarten Punkten X verbunden.

4.2. Ergebnisse

Durch Einspeisung von Kalibrierimpulsen am detektorfernen Ende wurden die Ansprechschwellen und erreichbaren Meßempfindlichkeiten bei den einzelnen Varianten ermittelt (Tafel 2).
Bei der galvanischen Kopplung bringt die einpolige, potentialbezogene Variante die höchste Empfindlichkeit, wobei diese mit Annäherung an die Übergangsstelle Schirmdrähte/Erdzuleitung zunimmt (Bild 5). Bei einem Grundstörpegel von max. 2 pC waren 5 pC noch sicher nachweisbar. Bei der freien Feldkopplung ergaben sich für die Kabelprüfung nutzbare Empfindlichkeiten, wenn mit der scheibenförmigen Zusatzantenne und potentialbezogen gearbeitet wurde und dabei die ölgefüllten Endverschlüsse mit integriertem Hochspannungskoppelkondensator genutzt wurden. Mit dieser Variante waren ebenfalls 5 pC sicher nachweisbar. Dagegen brachte das Arbeiten mit freien Kabelenden einen erhöhten Grundstörpegel. Das Zwischenschalten von Induktivitäten in die Erdzuleitung der Sonde erhöhte deren Ansprechschwelle.
Ein Verschieben der Sonde entlang der Kabeloberfläche brachte keine signifikanten Unterschiede in den Meßwerten. Resultierend aus diesen Ergebnissen wurden TE an einem Kabel mit der potentialbezogenen freien Feldkopplung bei aufgesteckter Zusatzantenne gemessen. Der Grundstörpegel betrug dabei max. 2 pC. Mit der Sonde wurde bei einer Prüfspannung von $u_{peff.} = 15$ kV eine maximale scheinbare Ladung von $q_{i\,max} = 23$ pC registriert (Bild 6), der mit dem MTE 3 vergleichsweise gemessene Wert betrug 25 pC. Damit ist eine gute Vergleichbarkeit mit der Standardmessung gegeben.

5. Zusammenfassung

Die TE-Meßsonde ist als kostengünstiges Einfachmeßgerät für TE-Messungen im Kabelprüffeld geeignet.
Im Standardmeßkreis nach TGL 20625 (IEC 270) kann sie das konventionelle TE-Meßgerät ersetzen. Zu beachten ist dabei, daß aufgrund der höheren unteren Grenzfrequenz der TE-Sonde eine Abweichung der gemessenen TE-Werte gegenüber der Standardmeßtechnik auftreten kann. Die bisherigen Ergebnisse zeigen einen maximalen Fehler von 20 %. Eine TE-Fehlerortung ist mit der Sonde möglich, wenn sich der Fehlerort mehr als etwa 20 m vom detektorfernen Ende entfernt befindet. Ursache für diese Einschränkung ist das verminderte Auflösevermögen der Lichtwellenleiter-Übertragungsstrecke der Sonde. Beim Einsatz der Sonde außerhalb des Standardmeßkreises kommt der entscheidende Vorteil der Sonde, die Erfassung von TE-Signalen ohne Einsatz von Koppelkondensator und Meßimpedanz, zum Tragen. Die beiden Meßmethoden

— potentialbezogene freie Feldkopplung bei Nutzung einer scheibenförmigen Zusatzantenne,
— potentialbezogene einpolige galvanische Kopplung an die Erdzuleitung zum Prüfling

sind unkomplizierte, ohne großen Aufwand realisierbare Möglichkeiten, die es gestatten, TE im Kabel mit den in den einschlägigen Standards geforderten Empfindlichkeiten sicher nachzuweisen.

Literatur

[1] *Küllig, P.; Schierig, St.; Weißenberg, W.:* Erfahrungen mit Polyethylen als Isolierstoff für Mittelspannungskabel. ELEKTRIE, Berlin 35 (1981) 7, S. 363 bis 367
[2] IEC 270 Partial discharge measurement. Ausgabe 1981
[3] IEC 885 – 3 Test methods for partial discharge measurements on lengths of extruded power cable. Ausgabe 1988
[4] *Hauschild, W.; Küttner, H.; Thümmler, K.:* Systeme zur breitbandigen Messung von Teilentladungen in Hochspannungsisolierungen. ELEKTRIE, Berlin 35 (1981) 7, S. 353–357
[5] *Lemke, E.:* A new procedure for PD measurement on polyethylene insulated power cables. 3rd ISH. Mailand (1979), paper 41.02
[6] *Lemke, E.; Friese, G.:* Teilentladungssonde M 4202 – Aufbau, Wirkungsweise und Anwendungsmöglichkeiten. ELEKTRIE, Berlin 42 (1988) 2, S. 61–62
[7] *Lemke, E.:* Ein neues Verfahren zur Messung von Teilentladungen an langen Hochspannungskabeln. ELEKTRIE, Berlin 35 (1981) 7, S. 358–360
[8] *Lemke, E.:* Zur Problematik der Ortung von Teilentladungs-Fehlstellen in plastisolierten Hochspannungskabeln, ELEKTRIE, Berlin, 35 (1981) 7, S. 360–363
[9] *Osvath, P.; Biasutti, G.; Zaengl, W. S.:* Zur Ortung und Beurteilung von Teilentladungen an Kunststoff-Hochspannungskabeln. Bull. des SEV/VSE, Zürich 78 (1987) 9, S. 482–487

EA 6125

Berechnung der elektrischen Feldstärke in Kabelverbindungsmuffen und Kabelendverschlüssen mittels PC

D. Jegust, Berlin

1. Aufgabenstellung

Kabelgarnituren, Kabelverbindungsmuffen und Kabelendverschlüsse werden ständig den jeweiligen Erfordernissen angepaßt und zunehmend Kundenwünschen entsprechend modifiziert. Es stand die Aufgabe, schnell zuverlässige Berechnungsergebnisse verfügbar zu haben, um ohne hohen Zeitaufwand für Konstruktion und Prüfung auf Anfragen, Wünsche und neue Forderungen reagieren zu können. Ziel war eine zeitgemäße Berechnungsmethode zur Verringerung der Entwicklungsarbeit unter Einbeziehung dezentraler Rechentechnik.

2. Realisierung

Zur Anwendung kam ein numerisches Berechnungsverfahrens zur Feldberechnung nach [1]. Dazu wurde ein Berechnungsprogramm in BASIC unter SCP für einen Bürocomputer A 5120 erstellt. Es zeigte sich jedoch sehr schnell, daß für sinnvolle Berechnungen große Speicherkapazitäten und eine hohe Rechengeschwindigkeit notwendig sind. So erfolgte die endgültige Realisierung auf einem 16-Bit-Rechner (Arbeitsplatzcomputer A 7150).
Die Kombination des numerischen Berechnungsverfahren mit konventionellen Berechnungsmethoden ergab eine Verfahrensweise der Feldberechnung, die sich auf einem derartigen Personalcomputer gut verwirklichen läßt. Das betrifft die Genauigkeit der erreichten Ergebnisse genauso wie den zur Berechnung benötigten Zeitaufwand. Schließlich wurde das Programmpaket FELD 88 geschaffen, das auf einem Arbeitsplatzcomputer A 7150 lauffähig ist.

3. Berechnungsmethoden

Mit der konventionellen Berechnungsmethode [2] werden Feldbilder nach Bild 1 berechnet. Der Verlauf der Äquipotentiallinien wird in geschlossener Lösung der Laplaceschen Potentialgleichung

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = 0$$

mit den angegebenen Gleichungen bestimmt. Dargestellt ist die Feldverteilung in einem Feldsteuerkegel. Die Innenelektrode, ein gestreckter Zylinder mit dem Radius r_i (Leiter) führt ein Potential von 30 kV, wobei die Außenelektrode, eine gekrümmte rotationssymmetrische Mantellinie, Erdpotential führt. Die höchstzulässige tangentiale Feldstärke im Isolieraufbau soll in diesem Beispiel 0,5 kV/mm betragen.
Im Beispiel Bild 1 wird die tangentiale Feldstärke entlang der Außenelektrode konstant gehalten. Entlang der Oberfläche der Kabelisolierung r_a nimmt sie kontinuierlich ab.
Im Beispiel Bild 1 wird die tangentiale Feldstärke entlang der Oberfläche der Kabelisolierung konstant gehalten. Dieser Bereich stellt eine stark gefährdete Grenzfläche innerhalb der Isolieranordnung dar. Durch diese Dimensionierung tritt jedoch eine gewisse Zunahme der Feldstärke entlang der Außenelektrode ein. Diese Erhöhung der Beanspruchung wird überprüft.
Beide Dimensionierungsvarianten sind möglich, wobei durch letztere in Verbindung mit der Einführung moderner Werkstoffe, Erzeugnisse und Technologien in der Fertigung und Montage eine Verkürzung des Feldsteuerkegels und eine Längeneinsparung bei Muffen bis um 30% erreicht werden kann.
Für solche einfachen Aufbauten wie nach Bild 1 läßt sich diese Berechnungsmethode anwenden. In der Praxis liegen jedoch kompliziertere Elektrodenanordnungen vor, für die sich keine geschlossene Lösung der Potentialgleichung finden läßt. Es ist möglich, solche

Dipl.-Ing. *Detlef Jegust* ist Entwicklungsingenieur in der HA Anwendungstechnik im VEB Kabelwerk Oberspree (KWO) „Wilhelm Pieck".

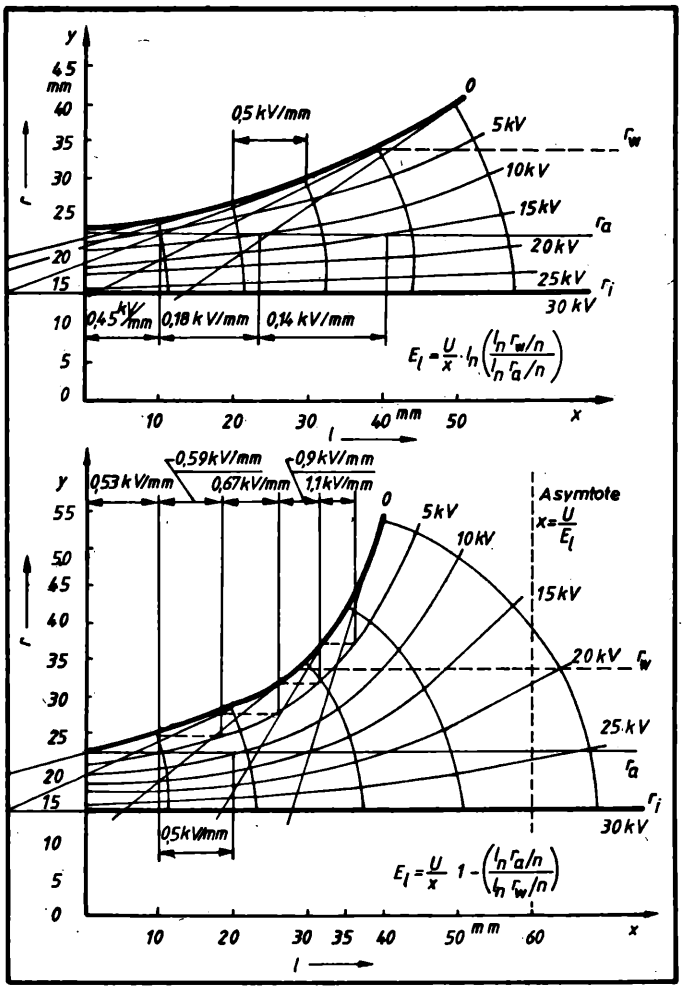


Bild 1. Darstellung des elektrischen Feldes im Winkelkegel
u = 30 kV; E_1 = 0,5 kV/mm

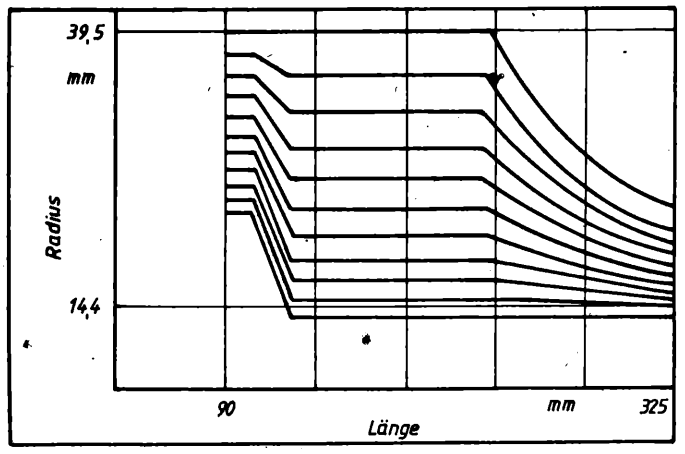
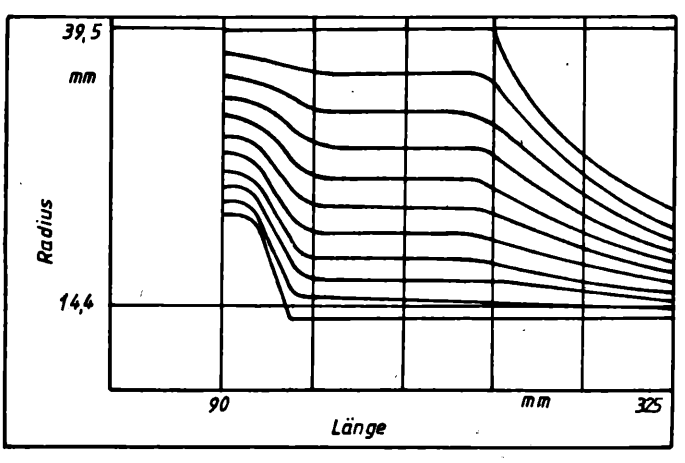


Bild 2. Potentiallinien in Schritten von 10 % ; Berechnung mit Grundformen

Bild 3. Potentiallinien in Schritten von 10 % ; numerische Lösung



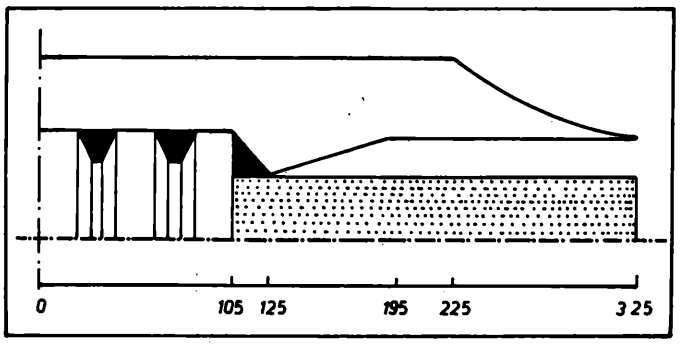


Bild 4. Vorveranschlagte Konstruktion der Feldsteuerung — Kabelmuffe
Leiterradius: 14,4 mm
Radius über Kabelisolierung: 22,4 mm
Radius über Wickelstelle: 39,5 mm
Radius der Leiterverbindungsstelle (z. B. Hülse): 23,5 mm
Länge der Leiterverbindungsstelle (v. Muffenmitte): 105,5 mm
Absetzlänge freier Leiter je Ader: 125 mm
Übergangsbereiche (Länge, Höchstfeldstärke):
Verbindungsstelle 19,5 mm, bei E = 1.022007 kV/mm
Kabelisolierung = 70 mm, bei E = 0,1876544 kV/mm
Wickelstelle = 100 mm, bei E = 2477567 kV/mm
Radiale Höchstfeldstärke: 2.4583 kV/mm
Länge eines homogenen Bereiches über die Kabelisolierung: 30 mm
Spannung: 30 kV
Absetzlänge der Aderschirmung (von Muffenmitte): 325 mm

Aufbauten in Grundformen zu zerlegen und einzeln zu berechnen. So entstehen jedoch Übergangsbereiche, die nicht beachtet werden, und man erhält eine unrealistische Lösung (Bild 2). Deshalb ist es notwendig, eine numerische Lösung der Differentialgleichung zur Bestimmung der elektrischen Feldstärke vorzunehmen. Zur Anwendung kommt das Finite Differenzen Verfahren nach *Gauß-Seidel-Liebmann* [3]. Über den Aufbau wird ein Netz von Potentialpunkten aufgespannt. Das Potential jedes einzelnen Punktes wird durch Iteration bestimmt, die bei Erreichen einer geforderten Genauigkeit abgebrochen wird. Bei diesem Verfahren wird die Elektrodenanordnung immer in ihrer Gesamtheit betrachtet, so daß die Ergebnisse als real angesehen werden können (Bild 3). Diese Berechnungsmethode ist ausschließlich für den Einsatz von Rechentechnik bestimmt.

4. Software

Das Programmpaket FELD 88 wird aus mehreren Unterprogrammen, Dateien und Routinen gebildet. Ein BASIC-Programmsystem stellt den Rahmen dar, von dem aus kompilierte Programme und Steuerprogramme aufgerufen werden.
Die Berechnungsergebnisse werden in mehreren Dateien angelegt. Das gesamte Programmsystem benötigt einen Speicherplatz von 400 kByte und läßt sich damit auf einer Diskette anlegen. Alle Berechnungsergebnisse liegen auf einer frei zu wählenden Datei endiskette vor. Im Laufe einer Abarbeitung werden Wertetabellen, Ergebnislisten und graphische Darstellungen zum Aufbau der Elektrodenanordnungen und des Dielektrikums sowie des elektrischen Feldes und der auftretenden elektrischen Feldstärke erzeugt.

5. Anwendung

Das Programmpaket FELD 88 wird zum Entwurf von Elektrodenanordnungen für Kabelverbindungsmuffen und Kabelendverschlüsse eingesetzt. Des weiteren wird für diese Anordnungen an jedem Punkt des Dielektrikums die auftretende elektrische Feldstärke bestimmt. Folgender Arbeitsablauf ist möglich:

1. Entwurf der Form und Abmessungen der Elektroden eines feldsteuernden Bereiches (Bild 4)
   — Vorgabe der Abmessungen und Berechnung der Feldstärken oder
   — Vorgabe der Feldstärken und Berechnung der Abmessungen.
   Die Formgebung erfolgt entsprechend dem gewählten mathematischen Modell, kann aber auch individuell erfolgen.
2. Aufspannen eines Potentialnetzes über die Anordnung und Berechnung der Potentialverteilung im Dielektrikum
   — Berechnung mit konventioneller Methode zur Vororientierung
   — Berechnung mit numerischem Verfahren durch Iteration.
3. Berechnung der im Dielektrikum auftretenden elektrischen Feldstärke in radialer und tangentialer Richtung und Auswertung durch Ausgabe von graphischen Darstellungen.

Es besteht die Möglichkeit, an jeder beliebigen Stelle im Dielektrikum und entlang frei wählbarer horizontaler oder vertikaler Ebenen die auftretende elektrische Beanspruchung zu überprüfen. Des weiteren kann der berechnete Aufbau auf besonders gefährdete Bereiche mit starker Feldstärkekonzentration untersucht und somit weitere Erkenntnisse für die Bemessung von Feldsteuerungen in Kabelgarnituren gewonnen werden (Bilder 5 und 6).

6. Schlußfolgerungen

Mit dem Programmpaket FELD 88 können feldsteuernde Elektrodenanordnungen entwickelt oder bestehende Aufbauten optimiert, modifiziert und überarbeitet werden. Durch Anwendung dieser Software wird wertvolle Zeit, die für aufwendige Berechnungen benötigt wurde, eingespart. Der Nutzer kann sich der eigentlichen kreativen Entwicklungsarbeit zuwenden.
Weiterhin ist er in der Lage, aufgrund der zügigen Berechnungen mehrere Varianten zu bearbeiten, ohne daß der Zeitaufwand für Feldberechnungen bedeutend größer wird. Die Prüfarbeit wird auf ein Minimum begrenzt, weil die Aufbauten den mathematischen Modellen entsprechend optimiert werden. Außer Kabelverbindungsmuffen und Kabelverschlüsse lassen sich alle rotationssymmetrischen Elektrodenanordnungen berechnen.
Das Programmpaket liegt auf Diskette vor. Es wurde eine Programmdokumentation erarbeitet, die Berechnungsbeispiele und eine Zusammenstellung der verwendeten Gleichungen enthält. Es ist vorgesehen, das Programmpaket weiter auszubauen und zu vervollkommnen, um so die Effektivität weiter zu erhöhen.

Literatur

[1] *Knörich, K.; Koller, A.:* Digitale Berechnung von ebenen und rotationssymmetrischen Potentialfeldern mit beliebigen Randbedingungen. ETZ — A 91 (1970), S. 339—344
[2] *Jegust, D.:* Optimierung von Wickelstellen in Verbindungsmuffen MXVEY für PE- und VPE-Kabel 10—230 kV. Praktikumsbeleg. Wismar 1986
[3] *Reichert, K.:* Über ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Magnetfeldern und Wirbelströmen in elektrischen Maschinen. Dissertation B. Technische Universität Stuttgart 1968

EA 6126

Bild 5. Tangentiale Feldstärke (> 0,2 kV/mm)

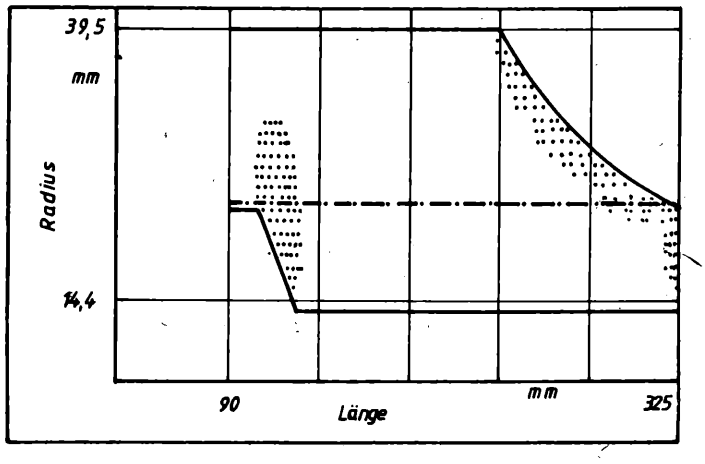
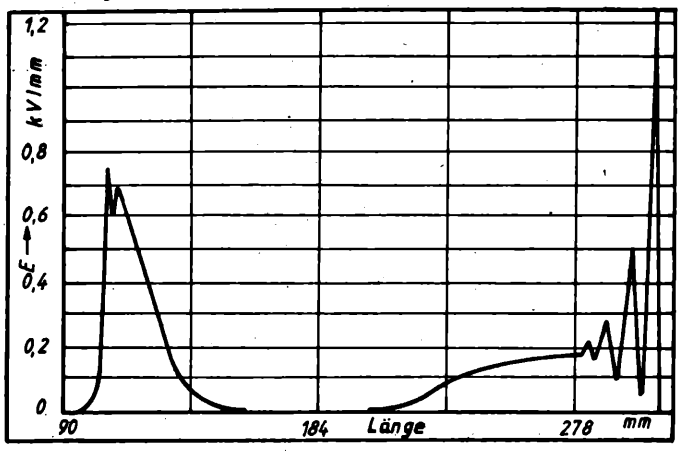


Bild 6. Tangentiale Feldstärke (längs) E_{max} = 1,262041 kV/mm; Schritt in r = 23,9 mm



Hochspannungstechnische Gesichtspunkte bei der Anwendung schwachinhomogener elektrischer Felder

W. Mosch, KDT; M. Dietrich, KDT; Dresden

Einen Schwerpunkt auf dem Gebiet der hochspannungstechnischen Forschung der letzten Jahre stellen zweifellos Erscheinungen dar, die mit der immer stärkeren Nutzung schwach inhomogener elektrischer Felder in Betriebsmitteln der Elektroenergieerzeugung, -übertragung und -verteilung im Zusammenhang stehen. Dazu zählt das elektrische Verhalten von typischen schwachinhomogenen Isolieranordnungen (gleich, ob mit festen, flüssigen, gasförmigen Isolierstoffen) ebenso, wie die damit im Zusammenhang stehenden hochspannungstechnischen Probleme, wie die Berechnung elektrischer Felder, das Auftreten von verry-fast-transient, die Notwendigkeit von Vor-Ort-Prüfungen und die technische Diagnostik (Tafel 1).

Im folgenden soll deshalb versucht werden, aufbauend auf einer Analyse der Grundidee der Nutzung schwachinhomogener Felder eine Reihe grundlegender Erkenntnisse darzustellen.

1. Grundideen zur Nutzung schwachinhomogener elektrostatischer Felder

Zwei Trends sind für die Anwendung schwachinhomogener Felder bei Ausrüstungen der Elektroenergieerzeugung, -übertragung und -verteilung typisch (Tafel.2):
Erstens besteht der Wunsch zur Miniaturisierung der Betriebsmittel durch neue Isolierstoffe, höher entwickelte Herstellungstechnologien und bessere Ausnutzung der gesamten Isolieranordnung bez. der elektrischen Festigkeit der Isolierstoffe;
zweitens existiert prinzipiell ein Trend zur Erhöhung der Übertragungsspannung. Den damit angestrebten geringeren Übertragungsverlusten sowie der Reduzierung des notwendigen Leitermaterials stehen dabei höhere Aufwendungen für die Isolierung gegenüber. Ziel ist, durch die verstärkte Anwendung schwachinhomogener Isolieranordnungen, zur ökonomisch vorteilhaften Erhöhung der Übertragungsspannungen beizutragen.

Tafel 1. Hochspannungstechnische Probleme und Lösungen, resultierend aus der Nutzung schwach inhomogener Felder

Kenntnisse über das elektrische Feld	• Hohes Niveau der numerischen Feldberechnung
Berücksichtigung oder Vermeidung von Störstellen	• Zielgerichtete Beeinflussung der Struktur von Isolierstoff und Elektrodenoberfläche • Auswahl geeigneter Herstellungs- und Montagetechnologien • Durchführung von Vor-Ort-Prüfungen
Berücksichtigung der Alterung	• Einführung von Diagnoseverfahren
schnelle Spannungsänderungen (VFTO) bei Schalthandlungen oder im Fehlerfall	• Beherrschung von VFTO im schwach inhomogenen Feld • Reduzierung der VFTO

Tafel 2. Technische Gesichtspunkte der Nutzung schwach inhomogener Felder

Ziele

- Reduzierung der Elektrodenabstände (Miniaturisierung)
- Beherrschung extrem hoher Übertragungsspannungen

Lösung

- Nutzung des schwach inhomogenen Feldes bei Optimierung der Mikro- *und* Makrostruktur unter Berücksichtigung der Aufgaben des Isolierens *und* Stromleitens

Vermeidung von jeglicher (meßbarer) TE	Vermeidung bestimmter intensiver TE (z. B. Leader)	Homogenitätsgrad so groß wie möglich

Die ideale Isolieranordnung, das Homogenfeld, ist technisch nicht realisierbar. Somit besteht einerseits die Forderung, den Homogenitätsgrad η der Anordnung so groß wie möglich zu wählen, andererseits muß aus technisch-technologischen Gründen sowie unter Berücksichtigung von Zuverlässigkeitsforderungen die Anordnung optimiert werden. Die Optimierung führte bei Luftisolierungen unter Freiluftbedingungen und bei Spannungen bis zu einigen 100 kV zur Anwendung starkinhomogener elektrischer Felder, während bei gegen Umwelteinflüsse gekapselten Isolierungen auf schwachinhomogene Felder orientiert wurde.
Im klassischen Sinne [1] wird unter einer Isolierung mit einem schwachinhomogenen Feld eine Isolieranordnung verstanden, bei der die höchste elektrische Beanspruchung des Isolierstoffes (E_h) die elektrische Festigkeit E_d des Isolierstoffes erst bei so hohen Elektrodenspannungen überschreitet, daß der mittlere Spannungsbedarf e einer gezündeten Entladung kleiner ist als die spezifische Elektrodenspannung (Elektrodenspannung bezogen auf den Elektrodenabstand). Aus dieser Überlegung läßt sich ein sogenannter Grenzhomogenitätsgrad η_G als Grenze zwischen stark- und schwachinhomogenem Feld ableiten $\eta_G = e/E_d$, der allerdings im technischen Sinne für die Dimensionierung von Isolieranordnungen nicht immer eine optimale Bemessung ergibt.
Es ist zweckmäßig, bei technisch orientierten Überlegungen zur Nutzung schwachinhomogener Felder die zielgerichtete Optimierung des elektrischen Feldes bei gleichzeitiger Beachtung weiterer Einflüsse (z. B. technologischer Einflüsse) zu verstehen, wobei je nach Isolieraufgabe unterschiedliche Zielstellungen existieren (Tafel 2).

Besteht die Aufgabe, Teilentladungen überhaupt zu vermeiden (z. B. bei der Dimensionierung kleinräumiger luftisolierter Schaltanlagen [2] oder bei Hochspannungsprüfanlagen) geht man von der klassischen Definition des Grenzhomogenitätsgrades aus und dimensioniert so, daß der Grenzhomogenitätsgrad gerade nicht unterschritten wird.
Bei Luftisolierungen für extrem hohe Spannungen ist eine solche Dimensionierung oftmals nicht möglich und das Ziel ist, besonders intensive Teilentladungen (Leaderentladungen) zu vermeiden. Hier muß durch eine möglichst gleichmäßige Beanspruchung der Luft im Bereich von einigen Metern vor den Elektroden eine kritische Streamerintensität [3], [4] bzw. kritischen Ladung [5] vermieden werden.
Im Hinblick auf die Kosten des Isolierstoffes und unter Beachtung, daß der Grenzhomogenitätsgrad stark vom Stoff selbst abhängt (E_d) ist eine dritte mögliche Zielstellung, so zu dimensionieren, daß ein möglichst großer Homogenitätsgrad erreicht wird (z. B. bei Isoliergasen und Isolierflüssigkeiten).
Weitere Bemerkungen sollen diese Überlegungen noch ergänzen: SF_6-Isolierungen können z. B. so dimensioniert werden, daß die Höchstfeldstärke minimal wird — bei koaxiale Isolieranordnungen z. B. mit

$\eta = 0{,}58$, d. h.

$r_a/r_i = 2{,}72$ — oder hinsichtlich optimaler Wärmeableitung

$\eta = 0{,}77$

[2] (maximale Durchgangsleistung). Beide Möglichkeiten ergeben eine Dimensionierung, bei der der Homogenitätsgrad deutlich über dem Grenzhomogenitätsgrad η_G liegt (Bild 1). Technologisch bedingte Abweichungen von der idealen Makrostruktur (z. B. durch sogenannte Störstellen) lassen sich über Korrekturfaktoren (z. B. Rauheitsfaktor, Zeitfaktor, Flächen- bzw. Volumenfaktor usw.) berücksichtigen [6].
Wesentlich anders sind die Verhältnisse bei festen Isolierstoffen zu bewerten. Die technisch nutzbare elektrische Festigkeit liegt hier im Bereich nur weniger Prozent der dem Isolierstoff eigenen hohen inneren elektrischen Festigkeit. Ursache dafür sind Inhomogenitäten im Isolierstoff, die als Störstellen zu bewerten sind. Damit ist das schwachinhomogene Feld über einen Grenzhomogenitätsgrad nicht mehr definierbar. Die technische Zielstellung ist jedoch analog der bei Isoliergasen und -flüssigkeiten und heißt optimale Nutzung des schwachinhomogenen Feldes, bei gleichzeitiger Orientierung auf mögliche Vermeidung von Störstellen.

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. *Wolfgang Mosch* ist Leiter des Wissenschaftsbereiches Hochspannungstechnik der Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden; Dr.-Ing. *Martin Dietrich* ist Technischer Direktor des VEB Transformatoren- und Röntgenwerkes Dresden.

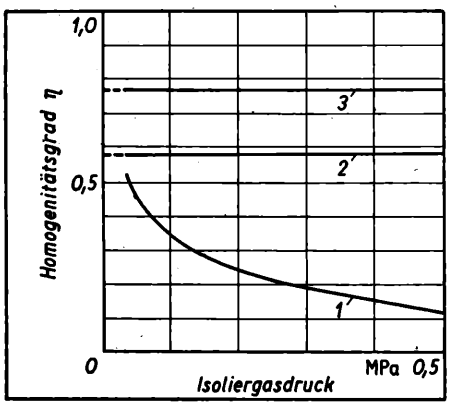


Bild 1
Abhängigkeit des optimalen Homogenitätsgrades η vom Dimensionierungskriterium
1 Grenzhomogenitätsgrad η_G
2 Minimierung der Höchstfeldstärke
3 Maximale Durchgangsleistung

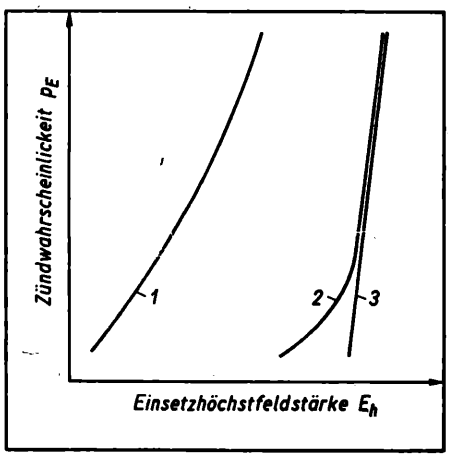


Bild 2
Typische Verteilungsfunktionen der Einsetzfeldstärke für großflächige Elektroden in Abhängigkeit vom Störstelleneinfluß
1 Dominierender Einfluß von Störstellen
2 Kleiner Einfluß von Störstellen
3 Ungestört

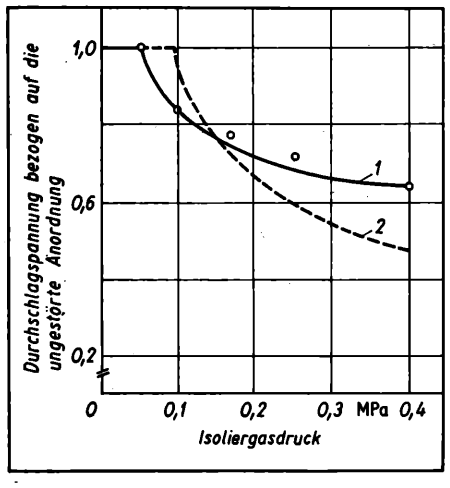
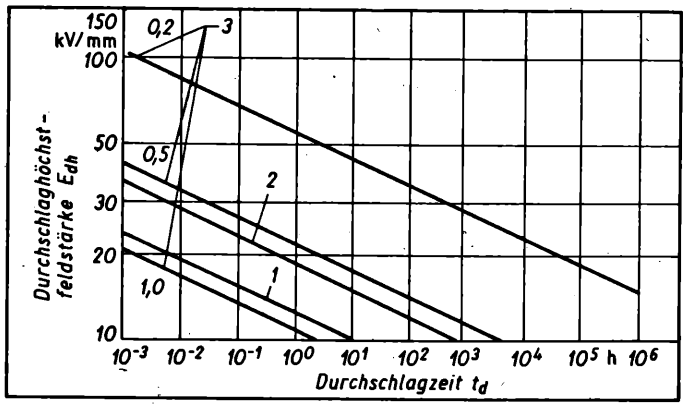


Bild 3
Beeinflussung der SF_6-Durchschlagspannung durch frei bewegliche Partikel
1 Konstanter Elektrodenabstand
2 Durchschlagspannung der ungestörten Anordnung bleibt konstant (Elektrodenabstand nimmt mit steigendem Druck ab.)

Bild 4. Einfluß von unterschiedlichen Fehlstellen in PE-Kabeln auf die elektrische Festigkeit
1 Hohlraum; *2* Stahlnadel; *3* Oxidierte PE-Partikel (Durchmesser in mm)



Der erstrebenswerte Homogenitätsgrad bezüglich der Makrostruktur der Elektrodenanordnung ergibt sich analog zu Isolieranordnungen mit Gasen oder Flüssigkeiten. Als Beispiel sei dazu das Kabel genannt. Hier wird der Innenradius durch die geforderte Stromtragfähigkeit bestimmt, der Außenradius ergibt sich aus dem elektrischen Feldverlauf der koaxialen Anordnung und der technologisch realisierbaren elektrischen Festigkeit am Innenleiter.
Zusammengefaßt ergibt sich, daß für alle schwachinhomogenen Isolieranordnungen die Beherrschung der Störstellenproblematik Grundvoraussetzung für ihre technische Nutzung ist. Dabei gilt: Je höher der angestrebte Homogenitätsgrad und je höher die elektrische Festigkeit des Isolierstoffes (unter Idealbedingungen) desto gravierender ist die Wirkung von Störstellen.

2. Gestaltung der Elektrodenanordnungen

2.1. Einfluß der Struktur der Elektrodenoberfläche und von Partikeln

Bei gasisolierten Isolieranordnungen beeinflußt die Struktur der Elektrodenoberfläche entscheidend die erreichbare elektrische Festigkeit gegenüber einem Idealzustand.
Für den Extremfall der technischen Nutzung großflächiger Elektroden zur Beherrschung von Spannungen von einigen Mega Volt (Hochspannungsprüfanlagen) kann die erreichbare elektrische Festigkeit bis auf etwa 40% gegenüber der zu erwartenden elektrischen Festigkeit nach *Schumann*, sinken. Das gilt zumindest für technisch interessante kleine Quantile der Durchschlag- oder Einsetzspannung. Ursachen sind unvermeidbare Störstellen [7].
Grundsätzlich verursachen Störstellen im hohen Maße Zufälligkeiten der Entladungsprozesse, so daß eine Beschreibung der Entladungsprozesse und ihre Anwendung zur Dimensionierung von Elektrodenanordnungen mit Methoden der mathematischen Statistik erfolgen muß. Für die Beschreibung nahezu aller Arten von Entladungsprozessen hat deshalb das Vergrößerungsgesetz der mathematischen Statistik fundamentale Bedeutung. Bei der Dimensionierung großflächiger Elektroden in Luft [4] (Bild 2) und SF_6 [8] wurden bei Anwendung des Vergrößerungsgesetzes gute Übereinstimmung zwischen Rechnungen und Messungen erzielt.
Einen bedeutenden Einfluß auf die elektrische Festigkeit haben freibewegliche Partikel, die dann besonders kritisch sind, wenn sie zur Initialzündung führen oder die Feldstärke vor der Elektrode deutlich erhöhen. Je höher der Isoliergasdruck desto stärker reduzieren Partikel die Durchschlagsspannung (Bild 3), z.B. [9]. Bei 50-Hz-Wechselspannung erhöht sich der Einfluß mit kleiner werdendem Elektrodenabstand.
Während die Erkenntnisse zur Dimensionierung von Druckgasisolierungen dank exakt reproduzierbarer Bedingungen nahezu als gesichert gelten können, sind insbesondere für Luftisolierungen unter Freiluftbedingungen weitere experimentelle Untersuchungen erforderlich, um die für die Dimensionierung erforderlichen Bezugsverteilungsfunktionen zu ermitteln [10].
Ein großer Einfluß muß dem immer vorhandenen Staub zugeordnet werden [11].

2.2. Isolierstoffstruktur

Während bei Gasisolierungen die Struktur der Elektrodenoberfläche und Partikel maßgeblich die technisch-realisierbare Nutzung des schwachinhomogenen Feldes bestimmen, ist es bei flüssigen und insbesondere festen Isolierstoffen die Isolierstoffstruktur. Die zielgerichtete Nutzung schwachinhomogener Felder setzt hochreine Isolierstoffe voraus. Die am schwierigsten zu beherrschende Störung hochreiner Polyethylen-Isolierungen stellen sogenannte water tree dar.
Trotz zielgerichteter Einflußnahme auf die PE-Mikrostrukturen wurde zumindest für Hochspannungskabel $\geqq$ 110 kV die Vermeidung des Eindringens von Wasser durch Schutz des Polyethylens vor Wasserkontakt als technisch-ökonomisch optimale Variante gefunden [12]. Dagegen werden bei Mittelspannungskabeln Erkenntnisse hinsichtlich der Entwicklung sogenannter water tree resistenter PE-Materialien genutzt [13]. Darüber hinaus widmen sich nach wie vor Forschungsarbeiten dem Einfluß technologischer Fehlstellen.
Kabelhersteller gehen heute davon aus, daß selbst bei derzeit höchstem ökonomisch vertretbarem Niveau der Kabelherstellung keine gleichmäßige Alterung der Gesamtisolation erfolgt, sondern die akkumulierenden elektrischen Zerstörungsprozesse an solchen Fehlstellen mit Abmessungen $> 10^{-5}$ cm erfolgen.

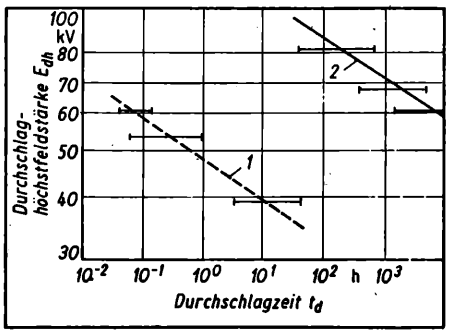


Bild 5
Einfluß des Härteranteils in Epoxidharz-Isolierungen auf die elektrische Festigkeit
1 55 %
2 35 %

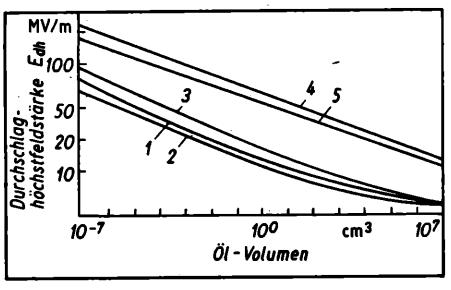


Bild 6
Einfluß von Volumen und Beanspruchungsdauer auf die elektrische Festigkeit von Isolieröl
1 1 min } Konstant-
2 30 min } Spannung
3 AC Spannungs-Steigerung
4 LI
5 SI

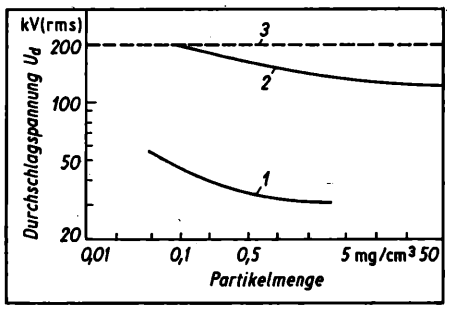


Bild 7
Partikeleinfluß auf die Durchschlagspannung von Isolieröl
1 leitfähige Partikel
2 nicht leitfähige Partikel (Zellulose)
3 sauberes Öl

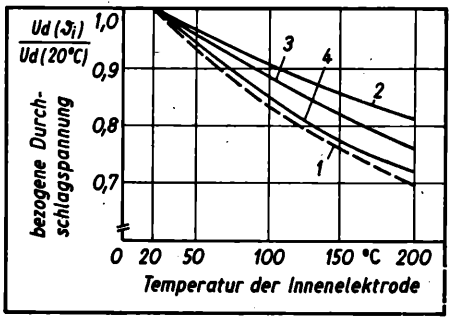


Bild 8
Einfluß der Elektrodentemperatur auf die Durchschlagspannung von SF_6 und Luft
1 Luft; 0,1 ··· 0,4 MPa; poliert
2 SF_6; 0,4 MPa; poliert
3 SF_6; 0,1 MPa- poliert
4 SF_6; 0,1 MPa; rauh

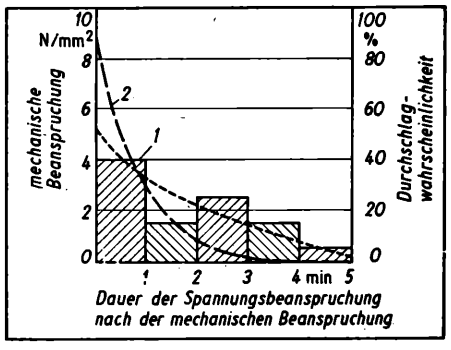


Bild 9
Einfluß mechanischer Beanspruchungen auf den Durchschlagprozeß
1 Durchschlagswahrscheinlichkeit
2 mechanische Beanspruchung

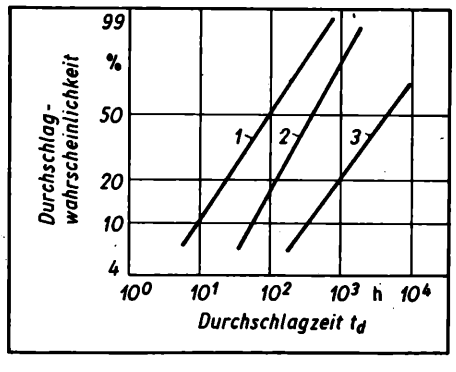


Bild 10
Einfluß thermischer Beanspruchung auf die elektrische Festigkeit von vernetzten PE-Isolierungen
1 unvernetzt
2 vernetzt, anschließend 1000 h bei 130 °C beansprucht
3 vernetzt, anschließend keine thermische Beanspruchung

Die Lebensdauer hängt von Form, Ort und Typ der Fehlstelle ab (Bild 4) [14]. Es ist zweckmäßig, Fehlstellen *mit* und *ohne* Hohlraum zu unterscheiden.

Der Einfluß der Verarbeitungstechnologie bei Nutzung schwachinhomogener Felder wird auch an Forschungsergebnissen zu Epoxidharz-Isolierungen deutlich. Während z.B. der Härtergehalt die Lebensdauer starkinhomogener Anordnungen kaum beeinflußt, ergeben sich für schwachinhomogene Anordnungen signifikante Unterschiede (Bild 5).

Die Reduzierung der elektrischen Festigkeit durch freibewegliche Partikel hat, wie bei gasförmigen Isolierungen, auch bei flüssigen Isolierungen große technische Bedeutung. Während Partikel in gasförmigen Isolierungen nur im Zusammenwirken von Bewegung und Elektrodenberührung technisch interessant sind, wirken sie im Isolieröl im gesamten Volumen festigkeitsreduzierend [15]. Der Volumeneffekt und offensichtlich auch die Anwendung des Vergrößerungsgesetzes sind nachweisbar (Bild 6). Analog zu gasförmigen Isolierungen wirken leitfähige Partikel wesentlich stärker als nichtleitende (Bild 7).

Bei Ölisolierungen gewannen in den letzten Jahren insbesondere Probleme der elektrostatischen Aufladung des Öls bei Grenzleistungstransformatoren technische Bedeutung. Die hohe Auslastung der elektrischen Festigkeit des hochreinen Isolieröls im schwachinhomogenen Feld zwingt aus Gründen der Ölkühlung zu hohen Fließgeschwindigkeiten. Die Folge sind elektrostatische Aufladungen, die zu Feldänderungen und damit zur Reduzierung der Durchschlagspannung führen [16]. Dabei wird offensichtlich die Durchschlagswahrscheinlichkeit kurze Zeit nach der Inbetriebnahme des Transformators maximal, weil ungünstige Ladungsverhältnisse auftreten und wird nach längerer Zeit, offensichtlich durch die Alterung des Isolieröls bedingt, wieder geringer.

2.3. Einfluß der Elektrodentemperatur

Die Aufgabe der Stromleitung in den Elektroden und die daraus resultierenden Wärmeverluste entscheiden maßgeblich die Dimensionierung von Anordnungen mit schwachinhomogenem Feld.

Grundsätzlich kann wieder bestätigt werden:

Je höher die elektrische Festigkeit, desto empfindlicher ist die Reaktion auf Störgrößen, in diesem Fall Temperaturerhöhung. Bezogen auf Raumtemperatur ist die Reduzierung der elektrischen Festigkeit von SF_6 um so größer je höher der Isoliergasdruck und um so besser die Qualität der Elektrodenoberfläche ist (Bild 8).

Bei Feststoffisolierungen ist der Temperatureinfluß stark vom Isolierstoff abhängig. Bei inhomogenen Isolierstoffstrukturen (mit Quarzmehl angereicherte Epoxidharze) beeinflussen insbesonders kurzzeitige hohe Temperaturbeanspruchung (Kurzschlußströme) die Isolierung durch mechanische Wärmespannungen (Bild 9) [17].

Bei vernetzten PE-Kabelisolierungen, als Beispiel für eine hochreine Feststoffisolierung, bewirken hohe Temperaturen eine Desorption der Vernetzerspaltprodukte und führen dadurch zu einer Reduzierung der elektrischen Festigkeit (Bild 10) [18].

3. Berücksichtigung von very fast transient overvoltages

Eines der aktuellsten Probleme, insbesondere für SF_6-Schaltanlagen und Transformatoren, stellen derzeit sogenannte very fast transient overvoltages (VFTO) dar. Diese mit sehr hoher Frequenz (bis zu einigen 100 MHz) oszillierenden Überspannungen treten letztlich durch die Anwendung schwachinhomogener elektrischer Felder in SF_6-Schaltanlagen auf.

Durch die hohe Ausnutzung des Isoliergases werden über kurze Isolierstrecken hohe Spannungen beherrscht. Im Falle eines Durchschlages sind Zusammenbruchszeiten im ns-Bereich (Toeplersche Funkenkonstante) die Folge. Das betrifft sowohl den Fehlerfall (Erdschluß) als auch unvermeidbare Zündungen beim Schalten von Trennern.

Da eine SF_6-Schaltanlage eine nahezu ideale Wanderwellenleitung darstellt, kommt es zu VFTO, die sowohl die Schaltanlage selbst, als auch angeschlossene Betriebsmittel und darüber hinaus die Schutztechnik beanspruchen. Höhe und Frequenz der Überspannungen sind von der Konfiguration der Schaltanlage und den Momentanwerten der Spannungen unmittelbar vor dem Spannungszusammenbruch abhängig. Kritischste Fälle stellen dabei Phasenopposition sich schließender Trennerkontakte und Durchschläge bei Blitzspannung dar. Umfangreiche Auswertungen zeigen, daß mit Scheitelwerten bis 1,7 p.u., aber unter ungünstigen Bedingungen bis 2,5 p.u. zu rechnen ist [19]. Infolge vieler zufälliger Faktoren (z.B. Zeitpunkt des Trennerschaltens, Lastverhältnisse,

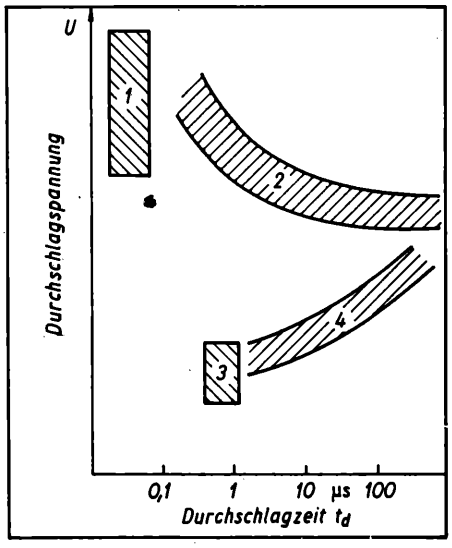


Bild 11
Durchschlagspannung-Zeit-Charakteristik für SF_6-Isolierungen
1 VFTO, ungestörte Oberfläche
2 Impulsspannung, ungestörte Oberfläche
3 VFTO, mit festen Störstellen
4 Impulsspannung, mit festen Störstellen

Phasenverschiebung über offener Trennstrecke) streuen die Scheitelwerte sehr stark. Die Wahrscheinlichkeit besonders hoher Scheitelwerte, herrührend von Durchschlägen bei Vor-Ort-Prüfungen mit Blitzimpulsspannungen ist gering.
Die Isolierungen der Betriebsmittel bis etwa 420 kV sind durch die Dimensionierung nach einer (in p.u.) relativ hohen Prüfblitzspannung vor Durchschlägen bei Auftreten von VFTO geschützt. Deshalb kam es erst in letzter Zeit, beim Einsatz von SF_6-Schaltanlagen mit Übertragungsspannungen > 245 kV zu einigen spektakulären Ausfällen und zur intensiven Beschäftigung mit den Erscheinungen und Wirkungen der VFTO.
Hinsichtlich der hochspannungstechnischen Dimensionierung von Ausrüstungen haben VFTO besondere Bedeutung bei den Schaltanlagen selbst und bei angeschlossenen Transformatoren. Deshalb soll im folgenden nur auf diese beiden Betriebsmittel eingegangen werden:

a) SF_6-Schaltanlagen

Für die ungestörte SF_6-Isolierung ist die Durchschlagspannung bei VFTO geringfügig höher als bei Blitzspannung. Dagegen ist bei Vorhandensein fester Störstellen die VFT-Durchschlagspannung niedriger, da keine raumladungsstabilisierende Wirkung an der Störstelle auftritt (Bild 11).
Die Wahrscheinlichkeit des Einflusses beweglicher Störstellen ist sehr klein und technisch ohne Bedeutung. Infolge des hohen Isolationswiderstandes von SF_6-Schaltanlagen (auch ein typischer Effekt schwachinhomogener Felder) können Rest-Gleichspannungen bedeutender Höhe über einige Minuten bestehen bleiben. Damit kann es auch zur Überlagerung von VFTO mit Gleichspannungen kommen. Abgeleitet aus Untersuchungen mit Blitzspannung, die einer Gleichspannung überlagert wurde, läßt sich nachweisen, daß solche kombinierten Spannungsbeanspruchungen nicht kritischer sind als eine reine VFTO-Beanspruchung (Scheitelwert der Summenspannung vorausgesetzt) [20].

Bild 12. Möglichkeiten der Erkennung von Störstellen in SF_6-Isolierungen mittels alternativer Prüfspannungen und Verfahren (In der Spalte 2, im Bereich 100...500 Hz muß TE-Test durch Stehspannungsprüfung ersetzt werden.)

Spannungsprüfung \ Defekte		feste Störstellen				frei bewegliche Partikel	Fehler im Feststoff
		Montagefehler	Rauhigkeit der Elektroden	Störstellen auf den Elektroden	Störstelle auf den Isolator		
DC	Stehspannungsprüfung	○	○	○	○	(●)	○?
	TE-Test	◑	—	◑	◑	(●)	○?
AC	30...70 Hz Stehsp.-prüfung	◑	○	○	◑	●	○
	100...500 Hz TE-Test	◑	○	○	◑	○	◑
	30...500 Hz TE-Test	◑	—	●	●	●	●
SI	Stehsp.-prüfung	◑	◑	○	◑	○	○?
OSI	TE-Test	◑	—	●	◑	◑	○
LI OLI	Stehspannungsprüfung	●	●	●	◑	—	—

● — exakt ◑ — annähernd exakt ○ — möglich — unmöglich

Diese Ergebnisse lassen zwei Schlußfolgerungen zu:
Erstens sollten auch im Hinblick auf mögliche VFTO feste Störstellen durch hohes technologisches Niveau im Montageprozeß vermieden werden.
Zweitens kann der Nachweis der Festigkeit gegenüber VFTO durch Vor-Ort-Prüfungen mit Blitzspannung erbracht werden, wobei hinsichtlich des notwendigen Aufwandes an Prüftechnik auf oszillierende Blitzimpulsspannung orientiert werden sollte (hoher Ausnutzungsgrad).
Bei Reihenspannungen > 420 kV muß ggf. die Prüfspannung gegenüber der standardisierten Prüfblitzspannung erhöht werden.

b) Transformatoren

Besonders hoch beansprucht werden die Eingangswindungen einer Transformatorwicklung. Bis zu 50% des Scheitelwertes der VFTO können z.B. die erste Windung einer ungeschildeten Lagenwicklung beanspruchen. Zur Verbesserung der Dimensionierungsgrundlagen werden experimentelle Untersuchungen zur elektrischen Festigkeit von Öl-Papier-Isolierungen bei sehr kurzen Spannungsimpulsen für notwendig erachtet bzw. werden ältere Ergebnisse unter diesem Gesichtspunkt erneut ausgewertet. Problematisch ist der große Einfluß der Amplitudendämpfung der VFTO auf die Durchschlagsspannung [21]. Bei den Experimenten werden typische Transformatorisolierungen mit SF_6-Schaltanlagenelementen gekoppelt und dann systematisch VFTO erzeugt.
Unter ungünstigen Bedingungen können VFTO auch zu Resonanzerscheinungen mit bedeutenden Spannungsüberhöhungen führen. Die Wahrscheinlichkeit solcher Resonanzerscheinungen ist gering und wird deshalb bei der Dimensionierung nicht berücksichtigt. Ebenso wird empfohlen, VFTO herrührend von Erdschlüssen in SF_6-Schaltanlagen bei Blitzüberspannungen auf Grund ihrer geringen Wahrscheinlichkeit nicht zu berücksichtigen und mögliche

Bild 13
Einfluß der Zeitparameter von Impulsspannungen auf die Erkennbarkeit von festen Störstellen in SF_6-Isolierungen

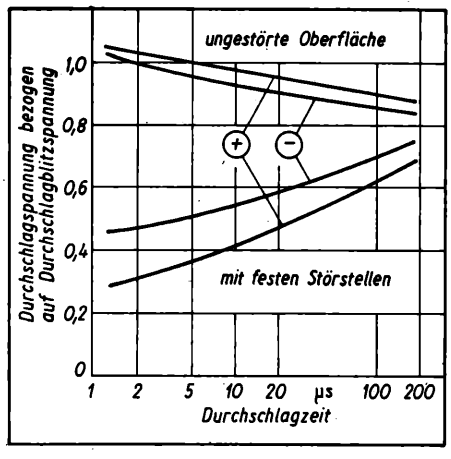
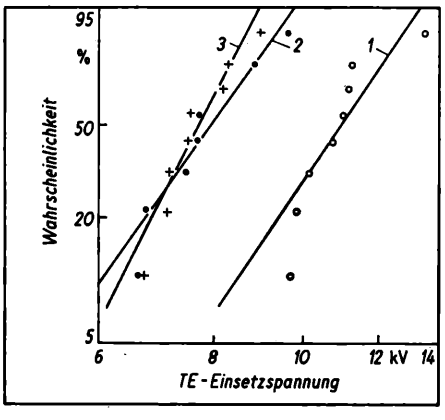


Bild 14
Vergleich der TE-Einsetzspannung für Schalt- und Wechselspannung an 10 kV-PE-Kabeln mit definierten Störstellen
1 SI; P_{TE} 95 %
2 SI; P_{TE} 2 %
3 AC



VFTO verursacht durch die Vor-Ort-Prüfung von SF_6-Schaltanlagen auszuschließen, indem diese Prüfungen grundsätzlich ohne angeschlossenen Transformator durchgeführt werden. Damit werden bei der Dimensionierung von Transformatorisolierungen nur VFTO bis etwa 2 p.u. berücksichtigt.
Analog den SF_6-Schaltanlagen ist es auch bei Transformatoren zweckmäßig, den Nachweis der elektrischen Festigkeit gegen VFTO

mit einer Blitzspannungsprüfung zu erbringen. Besondere Bedeutung hat dabei die Prüfung mit abgeschnittener Blitzspannung. Zur Gewährleistung von Abschneidezeiten < 200 ns wird der Einsatz von Vielfachabschneidefunkenstrecken empfohlen.

4. Vor-Ort-Prüfungen

Die intensive Beschäftigung mit Problemen der Vor-Ort-Prüfung resultiert ebenfalls aus der Anwendung schwachinhomogener Felder. Zum einen reagiert das Isoliervermögen sehr empfindlich auf Störstellen, die im Montageprozeß entstehen können und deshalb Vor-Ort einen nochmaligen Nachweis des Isoliervermögens erfordern. Zum anderen führt die Anwendung schwachinhomogener Felder zu relativ großen Kapazitäten der Prüfobjekte und erfordert somit aufwendige Prüftechnik, die transportfähig bzw. schnell montierbar sein muß. Daraus ergeben sich hochspannungstechnisch interessante Optimierungsaufgaben, um einerseits aus Prüfergebnissen mit ausreichender Sicherheit auf die Zuverlässigkeit der Anlagen schließen zu können und um andererseits einen vertretbaren Aufwand an Prüftechnik zu erreichen (Bild 12).
Besonders aufwendig sind Wechselspannungsprüfungen auf Grund der erforderlichen hohen Ladeleistung. Daraus resultieren Überlegungen zur Prüfung mit anderen Spannungsformen. Während die Prüfung mit Gleichspannung infolge der geänderten Feldverteilung nur in Ausnahmefällen Anwendung findet, wird mit beachtlichem Erfolg auf Impulsspannungsprüfungen orientiert. Von Bedeutung ist die Parameterwahl der Impulsspannung. Beispielsweise sind feste Störstellen in SF_6-Schaltanlagen nur mit Blitzspannung sicher erkennbar (Bild 13) [22]. Zu berücksichtigen ist jedoch bei SF_6-Schaltanlagen, daß die Wirkung beweglicher Partikel nur bei Prüfung mit 50-Hz-Wechselspannung real bewertbar ist. Da jedoch die Wirkung dieser Partikel mit größer werdenden Elektrodenabständen und damit höheren Übertragungsspannungen abnimmt, kann als Kompromiß der Verzicht auf eine Vor-Ort-Wechselspannungsprüfung ab einer Übertragungsspannung von 123 kV empfohlen werden.
In jedem Fall liefern TE-Messungen bei Vor-Ort-Prüfungen zusätzliche Informationen, vorausgesetzt, die Unterdrückung der Störeinflüsse wird beherrscht. Dabei wird sowohl auf Wechselspannungsprüfungen mit reduzierter Prüfspannung (geringere Ladeleistung bzw. Nutzung der Netzspannung) und auf TE-Messungen bei Impulsspannung orientiert.
Als erfolgversprechend sind bereits TE-Messungen bei Schaltimpulsspannung bei der Vor-Ort-Prüfung von Kabeln zu bewerten. Es läßt sich eine gute Korrelation zwischen der gemessenen Impulsladung bei Wechsel- und Schaltimpulsspannung nachweisen (Bild 14) [23].

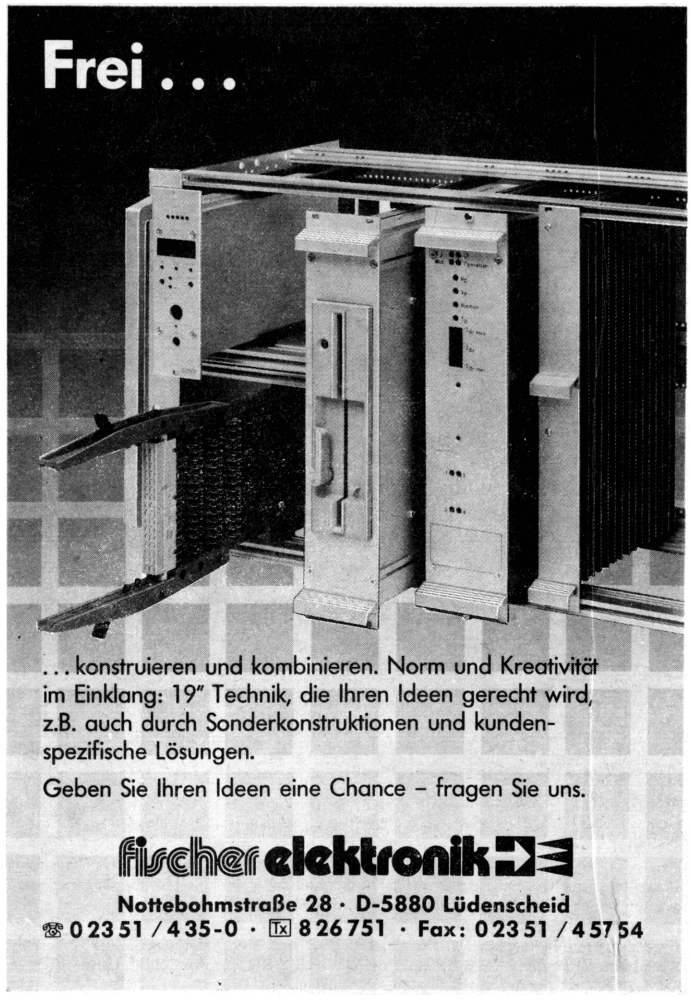
5. Zusammenfassung

Bei elektrotechnischen Betriebsmitteln für die Hochspannungs-Energieübertragung werden in immer stärkerem Maße Isolieranordnungen mit schwachinhomogenen elektrischen Feldern realisiert. Deshalb sind umfassende Kenntnisse vom Verhalten solcher Isolieranordnungen erforderlich.
Weitgehend unabhängig vom Isolierstoff und der Elektrodenanordnung kann nachgewiesen werden, daß technologisch bedingte Störstellen und andere, z. B. thermische Störbeeinflussungen, um so gravierender die elektrische Festigkeit reduzieren, je höher die elektrische Festigkeit des Isolierstoffes unter idealen (technisch nicht realisierbaren) Bedingungen ist.
Auch die Probleme durch das Auftreten und die Wirkung von VFTO und bei der Vor-Ort-Prüfung ergeben sich letztendlich aus der Nutzung schwachinhomogener Felder.

Literatur

[1] *Schwaiger, A.:* Lehrbuch der elektrischen Festigkeit der Isoliermaterialien. Berlin: Springer-Verlag 1919
[2] *Böhme, H.:* Tendenzen der Hochspannungs-Isoliertechnik inhomogener Felder. ELEKTRIE, Berlin 35 (1981) 10, S. 530–537
[3] *Lemke, E.;* et. al.: Dimensioning of electrodes in air for ultra high voltages. 4th ISH Athen (1983), p. 44.01
[4] *Mosch, W.;* et. al.: Dimensioning of screening electrodes for UHV test equipments based on a critical streamer intensity. 3th ISH Milan (1979) paper 52.04
[5] *Alexandrow, G.;* et. al: Flashover characteristics of long air gaps. 3th ISH Mailand 1979, p. 52.17
[6] *Mosch, W.; Hauschild, W.:* Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid. Berlin: VEB Verlag Technik 1979
[7] *Moeller, J.;* u. a.: Feldstärkeverlauf auf Abschirmelektroden für ultrahohe Wechselspannungen. Bull. SEV 63 (1972) 11, S. 574–578
[8] *Mosch, W.;* et al.: Computation of AC-breakdown voltage of SF_6 insulation under consideration of area effects. ICPIG XVI, Düsseldorf (1983) pp. 126 bis 127
[9] *Zwicky, M.; Zaengl, W.:* Investigations related to the dielectric strength of SF_6 in the frequency range of 30–200 Hz with respect to on-site testing of GIS. CIGRE-Symposium Wien (1987), p. 400-03
[10] *Dietrich, M.;* et al.: Behaviour of multisegment electrodes under outdoor conditions. 6th ISH (1989) New Orleans p. 2003
[11] *Schulz, W.:* Fremdteilchen als Ursache für Tiefdurchschläge in Luft bei Gleich- und Wechselspannung. Dissertation, TU Braunschweig 1977
[12] *Filippini, J. C.;* et al.: A review of investigations on the relationship between mechanical properties, polymer morphology and water tree growth in different polymers. CIGRE-Symposium Wien (1987), p. 620-04
[13] *Nagasaki;* et. a.: Philosophy of design and experienc on high voltage XLPE cables and acessories in Japan. CIGRE-Session (1988) p. 21-01
[14] *Weissenberg, W.;* et al.: The influence of thermo-oxidated and deteriorated particles of polyethylene as macroscopic imperfection and lifetime curve at AC stress in PE/XLPE insulated cables. CIGRE-Symposium Wien (1987), p. 620-02
[15] *Kako, Y.;* et al.: Influence of minute particles on breakdown characteristics of insulating oil. CIGRE-Session (1986), p. 15.03
[16] *Ieda;* et al.: Breakdown characteristic of moving transformer oil. IEEE Tr. Pow. and Syst. PAS 100 No. 2 Febr. 1981, pp. 921–928
[17] *Böhme, H.;* et al.: On the influence of thermal and mechanical stresses on the electrical endurance of epoxy-resin-insulated. 4th ISH Athen (1983), p. 23.01
[18] *Scharff, C.:* Zum elektrischen Langzeitverhalten von VPE-Starkstromkabeln nach zyklisch-thermischer Überlastung. 11. Wiss. Konferenz der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden (1987), Beitrag H 1-07
[19] Very fast transient phenomena associated with gas insulated substations. CIGRE-Session (1988), p. 33-13
[20] *Dietrich, M.; Hauschild, W.:* Schlußfolgerungen zur Vor-Ort-Prüfung von SF_6-Schaltanlagen unter Berücksichtigung des möglichen Auftretens von Very Fast-Transients mit überlagerter Gleichspannung. ELEKTRIE, Berlin 43 (1989) 1, S. 33
[21] *Breitfelder, D.;* et al.: Dielctric strength of transformer oil under impulse and high frequency voltage stress 5th ISH Braunschweig (1987), p. 22.12
[22] *Diessner, A.;* et al.: High voltage of SF_6 insulated substations on site. CIGRE-Session (1986), p. 33-06
[23] *Lemke, E.;* et al.: Experience with on-site diagnosis tests of extruded power cables and gas insulated switchgears (in preparation for the CIGRE-Session 1990)

EA 6130



Grundlagen für alternative Hochspannungsprüftechniken für Kabel mit extrudierter Kunststoffisolierung

M. Kahle, KDT; R. Porzel, KDT; B. Knüpfer; E. Neudert; Ilmenau

1. Problemanalyse

Prüfungen von Mittel- und Hochspannungskabeln dienen dem Nachweis der Produktionsqualität, der Einhaltung technischer Forderungen im Hinblick auf die Betriebssicherheit, der Überprüfung der Verlegung und der Ausführung von Verbindungstechniken und zunehmend mehr auch dem Alterungsnachweis. Ausgehend von den unterschiedlichen physikalischen Zusammenhängen zwischen Belastung, Fehlereinleitung und Ausfall sind zerstörende elektrische Prüfungen, insbesondere als Prototypprüfungen, quasizerstörungsfreie Prüfungen im Sinne des Teilentladungsnachweises und Stehspannungs- wie auch dielektrische Prüfungen erforderlich. Die meisten Prüfverfahren wurden ursprünglich für Kabel mit einem Mischdielektrikum entwickelt. Eine Anpassung erfolgte entsprechend für die Vor-Ort-Prüfung nach der Verlegung oder als vorbeugende Prüfung im Sinne der Betriebs- und Zustandsüberwachung. Beim Übergang auf extrudierte Kunststoffisolierungen, speziell auf LDPE- und XLPE-Isolierungen stellten sich beachtliche Probleme bei der Prüfung heraus. Das betrifft insbesondere die Vor-Ort-Prüfung mit Gleichspannung. Weiterhin stehen neue Erkenntnisse über mögliche technologische Fehler, über quantitative und qualitative Gesetzmäßigkeiten der Alterungsabläufe und neuartige Analysetechniken zur Verfügung, die Einfluß auf die konventionelle Prüftechnik nehmen können.
In diesem Sinne sollen im folgenden über Grundlagenerkenntnisse berichtet und prüftechnische Schlußfolgerungen und Empfehlungen abgeleitet werden.

2. Erkenntnisse über Durchschlagfestigkeit und Alterung in Abhängigkeit von der elektrischen Belastungsart

Unter prüftechnischen Aspekten spielen Möglichkeiten des Nachweises der elektrischen Festigkeit bei Betriebsfrequenz durch andere Spannungsformen eine beachtliche Rolle.
Analog trifft das für den Alterungsnachweis zu.
Im Stufen- oder Rampentest (Spannungssteigerungsversuch SSV) sind bei polymeren Isolierstoffen unter vergleichbaren Bedingungen die Festigkeitswerte für Gleich- und infrafrequente Wechselspannung bzw. für Halbwellenfolgen unterschiedlich gegenüber 50-Hz-Wechselspannung. Diese Tatsache liegt in der unterschiedlichen Alterungsrate durch die veränderten inneren Felder und in der Momentanfeldverteilung begründet [1]. Eigene Untersuchungen ergaben, daß die Äquivalenzfaktoren für die Durchschlagspannung bei 50 Hz und 0,1 Hz außerordentlich stark von den initiierenden Feldanordnungen und der Spannungssteigerungsgeschwindigkeit abhängen. Im schwach inhomogenen Feld ist im Falle des Polyethylens bei gleicher Spannungssteigerungsgeschwindigkeit etwa eine Verdopplung der Durchschlagspannung bei 0,1 gegenüber 50 Hz festzustellen.
Wird der Durchschlag im stark inhomogenen Feld eingeleitet, so liegt die Durchschlagspannung für 0,1 Hz niedriger als für 50 Hz, das Verhältnis der Einsatzspannungen hingegen entspricht dem im Falle des schwach inhomogenen Feldes. Die Relationen ändern sich mit der Geschwindigkeit der Spannungssteigerung. Verantwortlich hierfür sind die völlig unterschiedlichen Mechanismen der Kanalinitiierung und des Kanalaufbaus.

Prof. Dr.-Ing. *Manfred Kahle* ist Leiter des Wissenschaftsbereiches Elektrische Isolier- und Hochspannungstechnik; Doz. Dr. sc. techn. *Richard Porzel* ist Dozent, Dr.-Ing. *Ernst Neudert* ist Lektor, Dipl.-Ing. *Bernd Knüpfer* ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Wissenschaftsbereich Elektrische Isolier- und Hochspannungstechnik der Technischen Hochschule Ilmenau, Sektion Elektrotechnik.
Die Autoren danken den ehemaligen Mitarbeitern Dr. *Rühlicke* und Dipl.-Ing. *Dreßler* sowie den Herren Dr. *Flügge*, Dr. *Röhr* und Dr. *Laage* vom VEB Kombinat Kabelwerk Oberspree (KWO) „Wilhelm Pieck" für die wertvolle Unterstützung bei der Erarbeitung der vorliegenden Ergebnisse.

Wird der Durchschlag durch Teilentladungen in Hohlräumen begünstigt oder direkt eingeleitet, so ist die unterschiedliche Zündspannung für die einzelnen Frequenzen und Wellenformen zu beachten. Für das Verhältnis der Spannungssteigerungsgeschwindigkeiten von 1:500 für 0,1 Hz und 50 Hz sind die Einsatzspannungen in den Bildern 1 und 2 gekennzeichnet. Von Interesse ist, daß unter Berücksichtigung der oben angegebenen Spannungssteigerungsverhältnisse der Durchschlag in beiden Fällen nach etwa der gleichen Zahl von Belastungsperioden eintritt und die Durchschlagspannung im Rahmen der Streuung gleich ist. Offensichtlich wird der Durchschlag durch die Alterungsanteile jeder Periode unter besonderer Wirkung der Polaritätswechsel bestimmt. Bei unipolarer Halbwellenfolge mit 0,1 Hz steigt die Durchschlagspannung etwa auf das 1,3fache.
Es erscheint zweckmäßig, die Alterung unter den genannten Bedingungen im Konstantspannungstest zu untersuchen.
An entsprechenden Flachspaltmodellen mit Folien als festes Dielektrikum [2] wurden Lebensdauerkurven für 50 Hz und 0,1 Hz ermittelt (Bild 1). Entsprechende Kurven für Halbwellenfolgen dieser Frequenzen zeigt Bild 2.
Es ist zu erkennen, daß bei Wechselspannung 50 Hz mit fallender Feldstärke die Streuung der Lebensdauer und der Lebensdauerexponent kleiner werden. Das steht im Gegensatz zur reinen Feldalterung und muß auf das TE-Verhalten zurückgeführt werden. Die Alterungsgeschwindigkeit wird bei 0,1 Hz gegenüber 50 Hz stark herabgesetzt. Offensichtlich besteht ein feldstärkeabhängiger Äquivalenzfaktor. Eine besondere Bedeutung erhält die Mehrdeutigkeit der Lebensdauerkurve für 0,1 Hz Wechselspannung in einem bestimmten Feldstärkeintervall und die dabei auftretende hohe Streuung, die die Anwendbarkeit von Äquivalenzbeziehungen stark einschränkt. Eine Verbesserung bringt der Vergleich zwischen den Halbwellenfolgen mit 50 Hz und 0,1 Hz, jedoch ist deutlich zu sehen, daß zwar die Teilentladungen und ihre Wirkung vergleichbar sind, der hohe Alterungsanteil, der durch die Polaritätsumkehr zustande kommt, jedoch nicht wirkt.
Offensichtlich ist die TE-Alterung mit 0,1 Hz im Flachspalt nicht mehr mit der bei 50 Hz vom Mechanismus her vergleichbar. Der Lebensdauerexponent von 0,1-Hz-Kurven im Intervall von $n = 9 \cdots 11$ deutet auf eine Feldalterung hin. Wahrscheinlich wird durch die sehr geringe Entladungsimpulszahl je Halbwelle vorwiegend eine Oberflächenaufladung erzielt, welche die Alterungsfeldstärke an der Isolierfolie ausbildet. Tiefgehende lokalisierte Erosionen sind optisch jedoch auch nachweisbar. Der Polaritätswechsel bleibt dabei alterungswirksam.
Die im vorliegenden Fall stattfindende Alterung führt unmittelbar zum Durchschlag, da das Dielektrikum, gemessen an entsprechenden Kabelproblemen, auf eine sehr geringe Dicke beschränkt ist. Im Fall von Kabeldelaminierungen ist durch die TE-Alterung mit lokalisierter Hohlraumbildung und einem nachfolgenden Alterungsablauf aus Kanalansätzen heraus zu rechnen.
Zur Nachbildung solcher Kanalansätze sowie von Feldstörungen in Form von Festkörpereinschlüssen und water trees wurden Spitze-Platte-Untersuchungen durchgeführt [3].
Im Konstantspannungsversuch (KSV) existiert für die Kanaleinsatzzeit eine Verlängerung auf das etwa 400fache beim Übergang von 50 Hz auf 0,1 Hz (Bild 3). Im Gegensatz zum Flachspaltmodell mit Teilentladungen ist praktisch keine Feldstärkeabhängigkeit festzustellen. Im schwach inhomogenen Feld ohne TE wurde ein Faktor von 300 · · · 400 für die Durchschlagzeit ermittelt. Die Feldstärkeabhängigkeit ist dabei auf den Bereich sehr hoher Feldstärke (> 2 MV/cm) beschränkt. Der aus der Zahl der Nulldurchgänge erwartete Faktor von 500 wird nicht erreicht. Das steht im Zusammenhang mit der Raumladungsdynamik.
Die Vorwachsgeschwindigkeit der Tree-Kanäle unterliegt anderen Gesetzmäßigkeiten, die in Zusammenhang mit der druckabhängigen Gasentladung stehen. Die Degradationsrate ist für 0,1 Hz extrem stark feldstärkeabhängig und steigt oberhalb einer bestimmten Feldstärke auf ein Mehrfaches des Wertes bei 50 Hz.
Dieses Verhalten muß insbesondere bei Spannungssteigerungsprüfungen berücksichtigt werden, die die Initialphase und die Kanalaufbauphase durchlaufen.

3. Dielektrischer Nachweis von Alterungsvorgängen in unterschiedlichen Frequenzbereichen

Für die Qualität der Kabel sind die dielektrischen Verluste bedeutsam. Der Nachweis ist sinnvollerweise bei Industriefrequenz zu führen. Im Falle der Vor-Ort-Prüfung und des Alterungsnach-

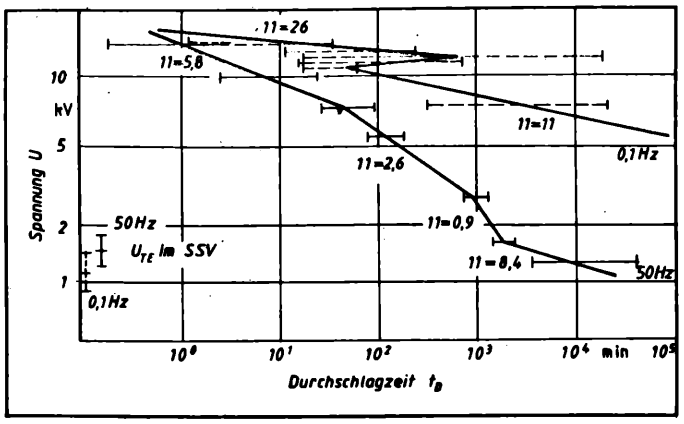


Bild 1. Lebensdauerkurven für PE-Folien bei Teilentladungsalterung (Spaltgeometrienachbildung) im schwach inhomogenen Feld bei 50 Hz und 0,1 Hz Wechselspannung (Es ist die Ziffer *11* durch den Buchstaben *n* zu ersetzen.)

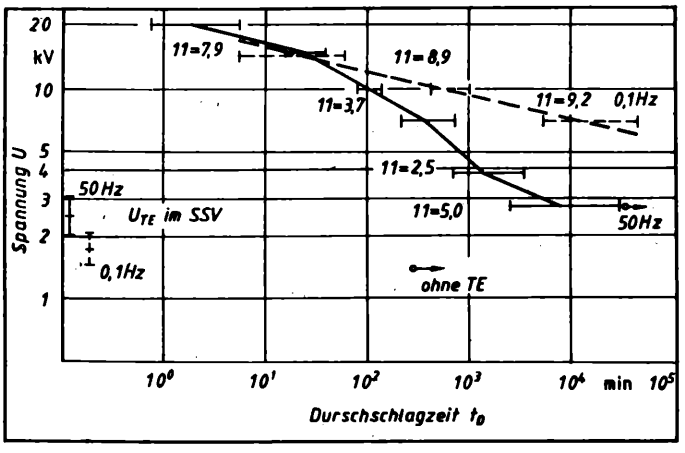


Bild 2. Lebensdauerkurven für PE-Folien bei Teilentladungsalterung (Spaltgeometrienachbildung) im schwach inhomogenen Feld bei 50 Hz und 0,1 Hz, positive Halbwellenfolge (Es ist die Ziffer *11* durch den Buchstaben *n* zu ersetzen.)

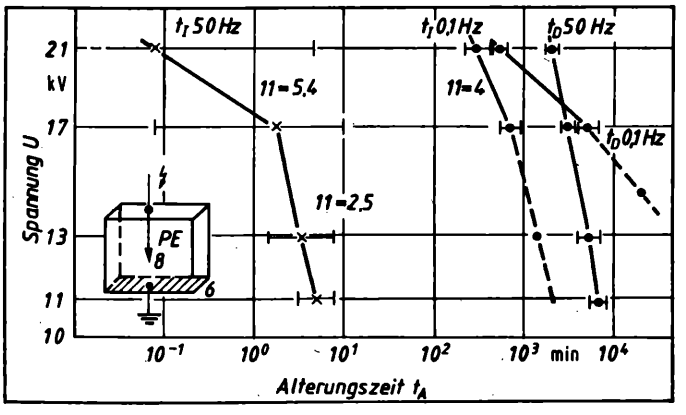


Bild 3. Vergleich der Kanalinitiierungszeit t_I und der Durchschlagzeit t_D für elektrische Belastungen mit 50 Hz und 0,1 Hz im stark inhomogenen Feld (Es ist die Ziffer *11* durch den Buchstaben *n* zu ersetzen.)

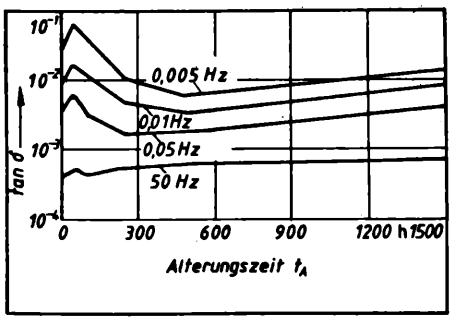


Bild 4
Dielektrischer Verlustfaktor eines XLPE-Kabels als Funktion der Zeit der thermischen Alterung bei 130 °C

weises in Betrieb befindlicher Kabel ist die Frage nach der Anwendung von Infrafrequenzspannungen zu beantworten. Zu klären ist auch die Möglichkeit, über zusätzliche Teilentladungsverluste Aussagen machen zu können.

Danach sollte zwischen dem Nachweis von alterungsbedingten Veränderungen der Struktur des Isolierstoffs und den aktuellen dielektrischen Größen, die das Verlustniveau bzw. im Falle des TE-Anteils das Zerstörungspotential beschreiben, unterschieden werden.

Der Veränderungsnachweis ist bei PE-Isolierstoffen besonders deutlich im Gebiet der Infrafrequenzen zu führen, da die Strukturänderungen sich stark auf die Zahl und energetische Tiefe von Ladungsträger-Haftstellen auswirken, die wiederum für die Relaxationsprozesse im Sekunden- bis Stundenbereich verantwortlich sind. In diesem Gebiet ist auch eine beachtliche Temperaturabhängigkeit vorhanden und für eine Differenzierung einsetzbar. So fallen die Vorteile der Vor-Ort-Prüfung bei Infrafrequenzen mit leistungsschwachen Anlagen mit den Möglichkeiten des Strukturänderungsnachweises zusammen. Extrapolationen zu 50 Hz sind im allgemeinen nicht quantitativ möglich, Korrelationen sind jedoch zu Laboralterungsergebnissen herstellbar. Durch Fourier-Analyse der infrafrequenten Ströme lassen sich mit Hilfe der Frequenz- und Spannungsvarianten Zusammenhänge zwischen Leitfähigkeits- und Polarisationsprozessen sowie Teilentladungseinflüssen untersuchen.

Bild 4 zeigt die Möglichkeit des Nachweises der thermischen Veränderung eines XLPE-Modellkabels in Abhängigkeit von der Zeit. In diesem Fall sind strukturelle Veränderungen innerhalb von 50 h der Alterung bei 130 °C zwischen 50 Hz- und Infrafrequenzmeßtechnik qualitativ in Übereinstimmung, wobei die Infrafrequenznachweistechnik offensichtlich die höhere Auflösung bietet.

Schon in den nachfolgenden 200 h und insbesondere beim Wirksamwerden der thermisch-oxidativen Abbauprozesse ist eine deutliche Überlegenheit der IF-Technik festzustellen.

Möglichkeiten der Analyse des Einflusses von Teilentladungen an Modellen zeigen die Bilder 5 und 6 am Beispiel der Realteildarstellung und des tan δ des infrafrequenten Stromes in Abhängigkeit von der Spannung. Modell 1 repräsentiert die reine Gasentladungsstrecke, Modell 2 die Parallelschaltung von Kapazitäten zur Gasentladungsstrecke und Modell 3 die Gasentladung + Parallelkapazität + Isolierstoffschichtung. Zusätzlich wird mit Modell 4 ein TE-behafteter Hohlraum nachgebildet. Eine Übertragung auf Kabelisolierungen mit Hohlraumentladungen ist in Abhängigkeit von den Stromverhältnissen denkbar, wenn extreme TE-Beanspruchung vorliegt.

In ähnlicher Weise sind water-tree-Strukturen nachweisbar, die ja selbst leitfähige Einschlüsse (bow tie trees) oder stark inhomogene Elektroden (vented trees) darstellen und insgesamt eine Kapazitäts- und Leitfähigkeitsveränderung bewirken.

4. Nachweis, Ortung und Identifikation von Teilentladungen durch computergestützte Analyse

Während für die Produktionsüberwachung konventionelle Teilentladungsmeßverfahren eingesetzt werden [4], bestehen Probleme bei der Überprüfung verlegter Kabel. In einem gewissen Umfang sind Sondenmethoden einsetzbar [5]. Wünschenswert wäre eine Methode zum Nachweis und zur Identifikation des Teilentladungstyps während des Betriebes, um daraus Schlußfolgerungen über die Art des Fehlers, die Gefährdungssituation und die wahrscheinliche örtliche Lage ziehen zu können ohne auf eine Prüfspannungsquelle oder die Spannungsvariation angewiesen zu sein. Besondere Bedeutung hat dabei die Überprüfung der Kabelendverschlüsse und der Verbindungsmuffen.

Zur Klärung der diesbezüglichen Möglichkeiten wurden Modelluntersuchungen mit einem computergestützten Teilentladungsdiagnostiksystem durchgeführt [6]. Untersucht wurden Modelle, die flache Spaltgeometrien, sphärische Einschlüsse, Treeing-Entladungen und Gleitentladungen repräsentieren. Verteilungen der scheinbaren Ladung und abgeleiteter Größen, insbesondere die funktionelle Zuordnung der mittleren Ladung zur Phasenlage und die zeitliche Entwicklung höherer statistischer Momente geben Aufschluß über den Entladungstyp. Die Bilder 7 bis 10 sollen typische Entladungsarten, die auch für die Kabelprüftechnik von Bedeutung sind, darstellen. Es ist zu erkennen, daß durch die Entladungsverteilung Hohlraumentladungen von Gleitentladungen deutlich unterschieden werden können. Aber auch unterschiedliche Hohlräume, wie Flachspalten, sphärische Einschlüsse und trees lassen sich differenzieren.

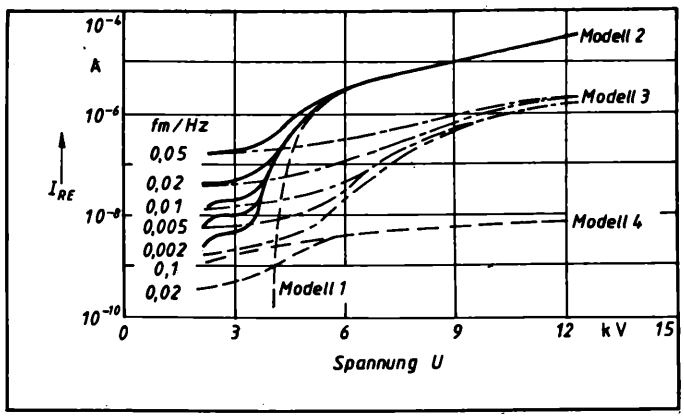


Bild 5. Realteil des Isolationsstromes von dielektrischen Modellanordnungen mit Teilentladungseinwirkung bei Infrafrequenzbelastung

Modell 1 Spitze-Platte-Anordnung
Modell 2 Spitze-Platte-Anordnung mit parallelgeschalteter Kapazität
Modell 3 Spitze-Platte-Anordnung mit Parallelkapazität und dielektrischer Plattenabdeckung
Modell 4 Flachspaltanordnung im Dielektrikum mit zusätzlicher Parallelkapazität

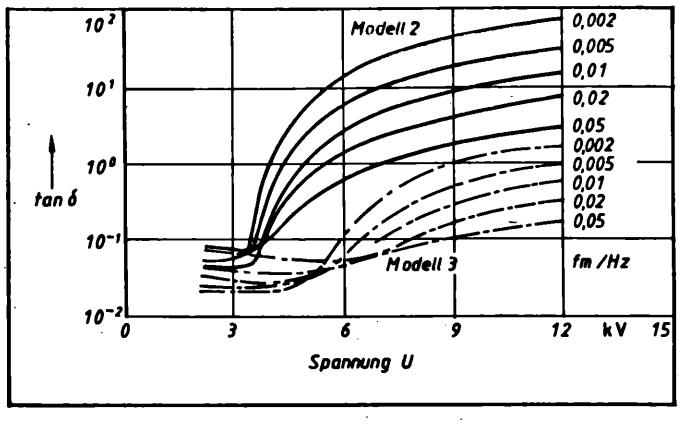
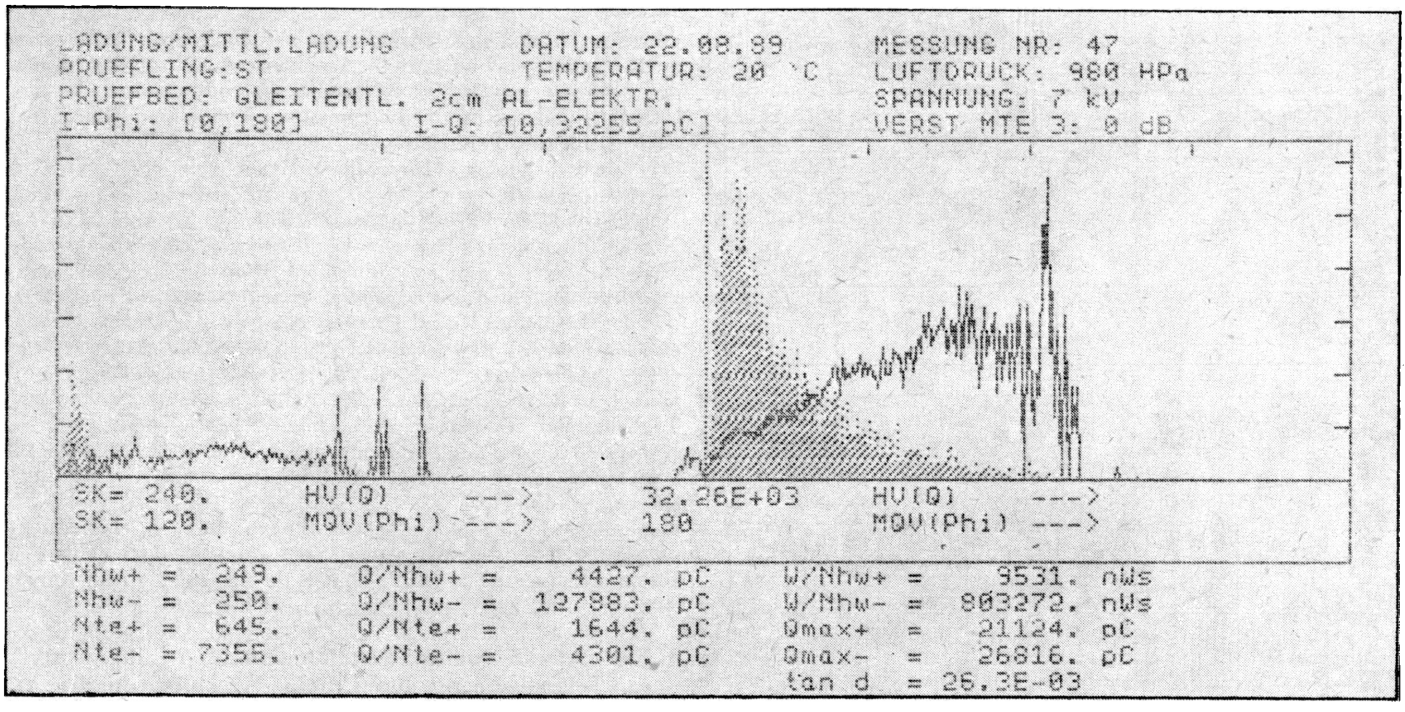


Bild 6. Dielektrischer Verlustfaktor als Funktion der Infrafrequenzspannung bei Anordnungen entsprechend Bild 5

Bild 7. Statistische Verteilung der scheinbaren Ladung (punktiert) und Verteilung der mittleren Ladung (Vollstrich) über der Phasenlage einer Modell-Gleitanordnung



5. Schlußfolgerungen und Empfehlungen für die Einführung alternativer Prüftechniken

5.1. Produktionsqualitätsüberwachung

Die Überprüfung der elektrischen Festigkeit nach den gegenwärtigen Methoden hat entscheidende Nachteile. Erstens ist bei der 50-Hz-Stehspannungsprüfung ein beachtlicher Lebensdauerverbrauch an Störstellen zu erwarten, ohne daß eine sinnvolle Ausprüfung entsteht, und zweitens ist durch die fehlende Selektivität der Prüfung kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Stehspannung und Lebensdauer herstellbar. Im Falle der Gleichspannungsprüfung sind die bekannten Raumladungsfelder und ihre Wirkungen nachteilig.

Die hier vorgestellten Infrafrequenzdurchschlags- und Alterungsuntersuchungen zeigen einen möglichen Weg.

Wird das ungeschädigte und fehlerfreie Kabeldielektrikum mit einer 0,1-Hz-Spannung belastet, die gleich hoch wie die Stehspannung für 50 Hz ist, so beträgt die Alterungsgeschwindigkeit nur 2,5 ··· 3%, gegenüber industriefrequenter Wechselspannung. Entsprechend Kapitel 2 ist eine wesentliche Erhöhung der Prüfspannung möglich, oder es kann die Prüfzeit entsprechend verlängert werden.

Der zu verwendende Äquivalenzfaktor für Spannungs- und/oder Zeitvariation ist feldstärkeabhängig und muß für das betreffende Kabel aus dem 50-Hz-Stehspannungswert abgeleitet und experimentell bestätigt werden.

Andererseits ist es jedoch auch möglich, aus der durch Versuch zu ermittelnden Alterungsrate einen 0,1-Hz-Prüfstehspannungswert zu berechnen, wenn das Alterungsintegral für 50 Hz bekannt und die Lebensdauerforderung fixiert ist.

Prüfdauer und Prüfspannungshöhe sind nur dann im Rahmen des Alterungsintegrals im Vergleich zueinander beliebig variierbar, wenn keine Vorschädigung oder Fehlstelleneinwirkung im Dielektrikum vorliegt. Die Feststellung solcher Einflüsse ist jedoch gerade ein wesentliches Anliegen der Prüfung.

Sind Tree-Strukturen oder starke Inhomogenitäten vorhanden, die bereits bei geringer Alterung zum Treeing-Einsatz führen, so ist eine 0,1-Hz-Prüfung mit einer solch hohen Spannung angezeigt, die in wesentlich kürzeren Zeiten als die obere 50-Hz-Betriebsspannung des Kabels zum Durchschlag führt. Das bedeutet, bei Feldstärken zu prüfen, die oberhalb des Schnittpunktes der 50-Hz- und 0,1-Hz-Durchschlagzeitkurven gemäß Bild 3 liegen. Je nach Homogenitätsgrad des Feldes der Anordnung, d.h. der Fehlstelle, verändert sich die Schnittpunktlage. Gegenüber der Darstellung im Bild 3 ist bei natürlichen Einlagerungen mit einer Reduzierung der Schnittpunktspannung zu rechnen.

Natürlich müssen die Kurven für das konkrete Material und möglichst für die betreffende Kabelanordnung bestimmt werden. Der

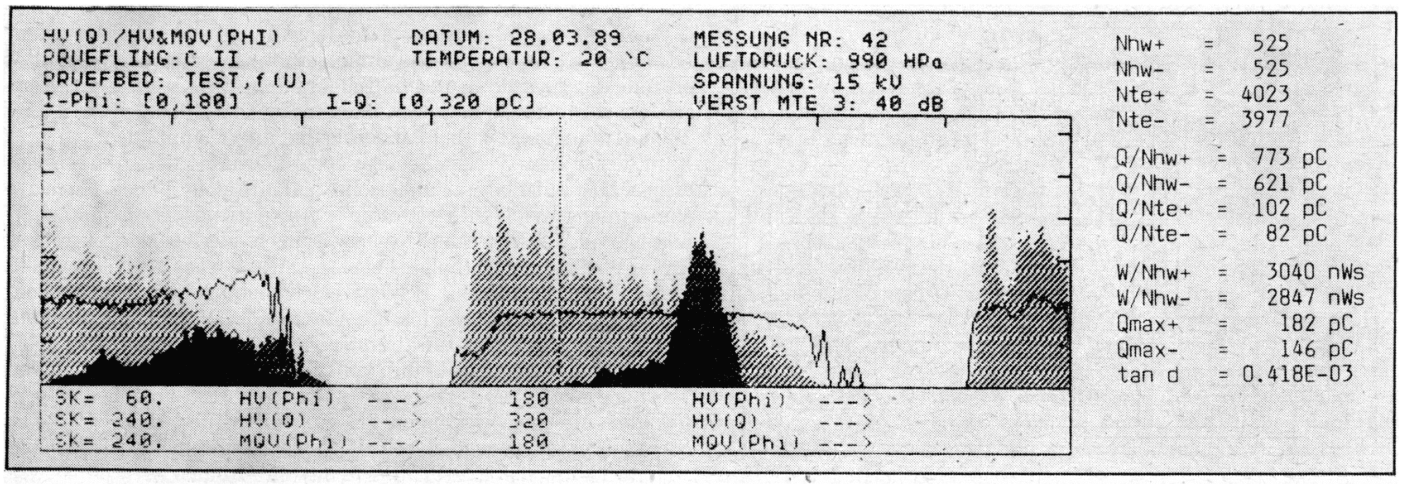
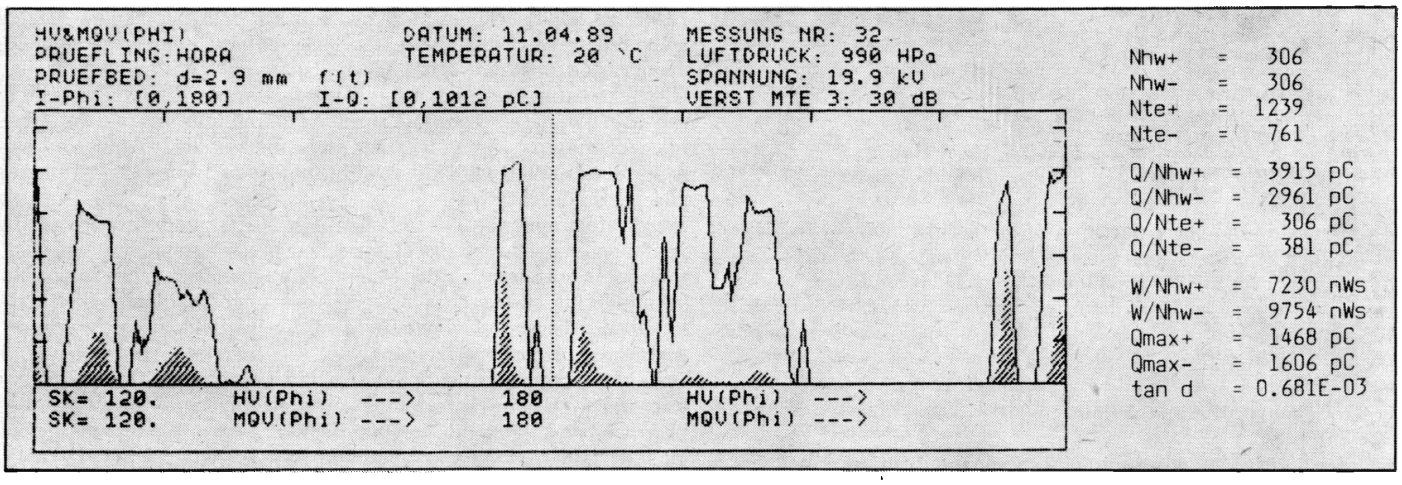


Bild 8. Verteilung der scheinbaren Ladung und der mittleren Ladung über dem Phasenwinkel der Prüfwechselspannung sowie statistische Verteilung der scheinbaren Ladungsgröße einer Flachspalt-Modellanordnung (Delaminierungserscheinungen an Schichtisolierungen)

Bild 9. Verteilung der scheinbaren Ladungsgrößen und der mittleren Ladung über der Phasenlage für einzelne sphärische Hohlräume in einem Dielektrikum



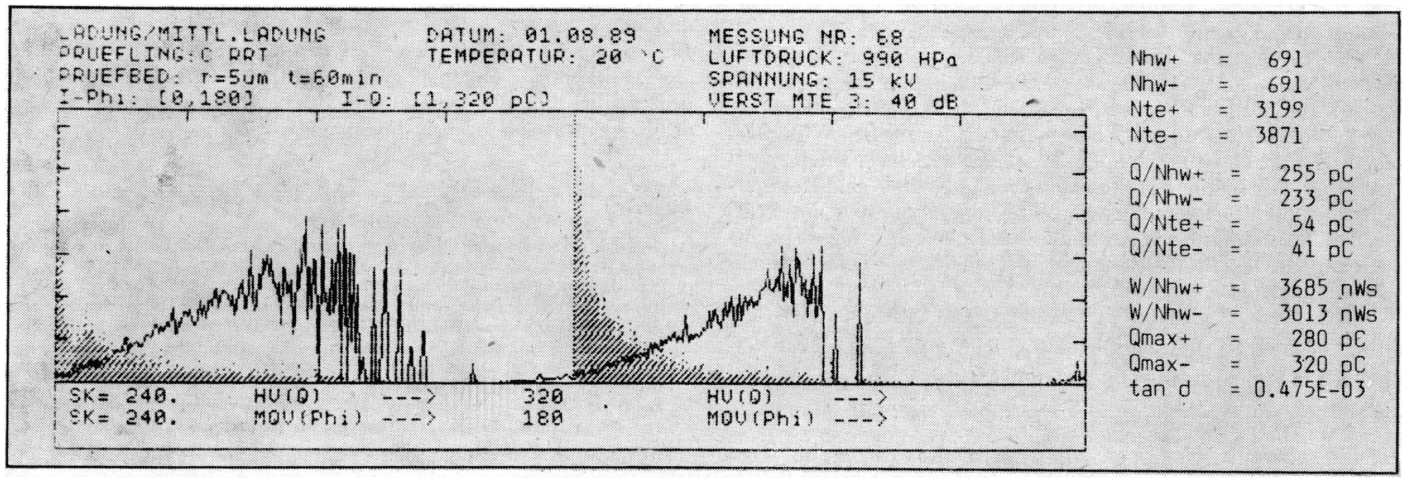


Bild 10. Statistische Ladungsgrößenverteilung und Verteilung der mittleren Ladung über dem Phasenwinkel der Prüfwechselspannung bei der Ausbildung eines Treeing-Kanals

Feldstärkewert (bzw. Prüfspannungswert) muß so gewählt werden, daß die Durchschlagzeitpunkte für 50 Hz Betriebsspannung und 0,1 Hz (Prüfspannung) möglichst weit auseinander liegen. Die obere Spannungsgrenze wird durch die Durchschlagzeit gegenüber dem ungestörten Dielektrikum bestimmt. Daraus ergibt sich jedoch, daß sich das Ausprüfen mit Hilfe der 0,1-Hz-Spannung nicht auf Fehlstellen erstreckt, die bei normaler 50-Hz-Betriebsbelastung erst nach Jahren zum Ausfall führen würden.

Eine Qualitätsprüfung mit 0,1 Hz ist möglich und zweckmäßig. Die Aussagefähigkeit zur Zuverlässigkeit erhöht sich gegenüber einer 50-Hz-Prüfung jedoch nur begrenzt, da differenzierende Ausprüfvorgänge einen verhältnismäßig geringen Alterungszeitraum gegenüber der zu garantierenden Lebensdauer umfassen.

Zieht man Hohlräume und Flachspalten in Betracht, so ist bei 0,1-Hz-Prüfspannungen mit einer lokalisierten TE-Alterung mit der Folge von Tree-Kanalansätzen zu rechnen. Weiterhin findet eine Feldalterung mit sehr niedriger Alterungsrate statt. Bei vergleichbaren mittleren Belastungsfeldstärken der Kabelisolierung bildet sich an stark inhomogenen Stellen der TE-Kanal bei 0,1 Hz um mehrere Größenordnungen früher aus als der Kanalansatz im Falle von Hohlraumentladungen. Bei 50-Hz-Beanspruchung sind die Verhältnisse hinsichtlich des Alterungsvergleiches komplizierter und gegenüber 0,1 Hz nicht in einfacher Form durch einen Äquivalenzfaktor zu beschreiben. Damit kann festgestellt werden, daß vorhandene Hohlräume bei der 0,1-Hz-Prüfung faktisch in ihrer möglichen Initiierungswirkung für Betriebsfrequenz unter-

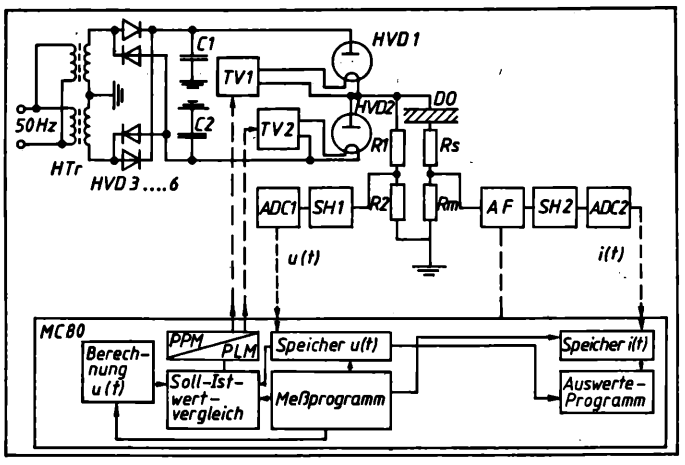


Bild 11. Hard- und Softwarekomponenten des Infrafrequenz-Prüf- und -Analysesystems

HVD1,2	Hochspannungs-Glühventil
HVD3 ··· 6	Hochspannungsgleichrichter
HTr	Hochspannungstransformator
C1, C2	Hochspannungs-Stützkondensatoren
TV1,2	Transverter für Heizleistungssteuerung
DO	Diagnoseobjekt, Kabelprobe
R1, R2	Hochspannungs-Meßteiler
Rs	Schutzwiderstand
Rm	Meßwiderstand
AF	stellbarer Meßverstärker
SH1,2	Sample-and-Hold-Schaltung
ADC1,2	Analog-Digital-Wandler
PPM/PLM	Pulspaketmodulation und Pulslängenmodulation
MC 80	Mikrorechnersystem

bewertet sind. Die gegenwärtig vorliegenden Ergebnisse gestatten jedoch noch keine genügend genaue Äquivalenzbewertung.
Als integrale Prüfung der Kabelqualität erscheint die Infrafrequenzstromanalyse zweckmäßig, da Abweichungen von der Materialzusammensetzung, von der vorgeschriebenen Vernetzungsstruktur und von den Vernetzerresten schnell und sicher erfaßt werden können. Bei einer solchen Analyse würde zusätzlich eine Aussage im Rahmen der Festigkeitsprüfung zu Hohlraumentladungen und Treeing-Prozesse anfallen.
Die gleichzeitige Anwendung eines rechnergestützten Teilentladungsanalysesystems kann nicht nur den konventionellen TE-Nachweis erbringen, sondern zusätzliche Aussagen über den Entladungstyp und damit über TE-Zuordnungen machen.
Für die vorgenannten Prüfaufgaben ist ein geeigneter Hochspannungs-Infrafrequenzprüfgenerator erforderlich. Zur flexiblen Anpassung hinsichtlich Frequenz, Spannungsform und Amplitude an den Prüfvorgang wurde ein Generator entwickelt, dessen Wirkungsweise aus Bild 11 zu entnehmen ist. Charakteristisch ist die softwareseitige Festlegung des Spannungsverlaufes über eine Rechnersteuerung mit Rückkopplungskorrektur der Spannung am Prüfling. Die Spannungsformgenerierung wird über eine Impulspaketsteuerung der Emissionsleistung der Katoden der beiden Hochvakuumdioden vorgenommen.
Der Rechner wird gleichzeitig für die Isolationsstromanalyse genutzt. Gegenwärtig steht ein Generator für $\hat{U}$ von $\pm$ 30 kV zur Verfügung. Ein Generator für $\hat{U}$ von $\pm$ 80 kV ist in Vorbereitung.

5.2. Vor-Ort-Prüfung

Der im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Generator kann wegen der nur geringen erforderlichen Prüfleistung bei $\leqq$ 0,1 Hz auch für die Vor-Ort-Prüfung eingesetzt werden.
Die Prüfung nach vollendeter Verlegung des Kabels kann damit in Analogie zur Produktionsqualitätsprüfung durchgeführt werden. Dabei genügt es, eine Stehspannungsprüfung analog zur Qualitätsprüfung durchzuführen und die Teilentladungsprozesse durch Stromanalyse zu überprüfen. Soweit letzteres nicht möglich ist, wird eine Teilentladungsanalyse bei Betriebsbedingungen empfohlen.
Eine bisher nur vereinzelt eingesetzte kontinuierliche oder periodische Zustandsüberwachung sollte zukünftig in Fällen extremer Versorgungszuverlässigkeitsforderungen, nach mechanischen, thermischen oder elektrischen Überbelastungen oder bei kritischen Verlegungsbedingungen (hohe Feuchtigkeit, starke Bodenaustrocknung, Bodensenkungen, Schichtverschiebungen u.a.) berücksichtigt werden: Hierbei werden die Vorteile der Vor-Ort-Prüftechnik mit dem angegebenen Infrafrequenzprüfgenerator besonders deutlich. Neben der Ausprüfung von Schwachstellen im Sinne von Treeing-Kanälen und Tree-Ansatzpunkten besteht auch die Möglichkeit, Alterungswirkungen als molekulare und mikroskopische Strukturveränderungen durch die Isolationsstromanalyse nachzuweisen. Es hat sich gezeigt, daß in diesem Rahmen auch die Detektion von water trees gelingt.
Hierzu sind allerdings weitere Untersuchungen erforderlich.

6. Zusammenfassung

Bisherige Prüfmethoden für extrudierte Kunststoffkabel zeigen zum Teil beachtliche Nachteile, insbesondere, wenn aus Gründen der Prüfleistung die 50-Hz-Wechselspannungsprüfung durch eine Gleichspannungsprüfung ersetzt werden muß. Eine Substitution der gegenwärtigen Spannungsprüfverfahren durch eine Infrafrequenzprüfung erscheint möglich und zweckmäßig. Damit sind sowohl fabrikmäßige Qualitätsprüfungen als auch Vor-Ort-Prüfungen gleichartig durchführbar.
Vergleichbarkeit besteht zwischen den 50-Hz- und Infrafrequenzprüfungen hinsichtlich des elektrischen Festigkeitsnachweises. Vorteile ergeben sich durch die höhere Schwachstellenausprüfquote bei verminderter elektrischer Alterung des ungeschädigten Dielektrikums. Von besonderer Bedeutung ist die Möglichkeit einer rechnergestützten Isolationsstromanalyse im Infrafrequenzbereich bei variabler Frequenz und Spannung und gegebenenfalls auch Spannungsform. Die im Infrafrequenzbereich angeregten Relaxationsprozesse sind zum hochempfindlichen Alterungsnachweis, aber auch zur Beurteilung von Vernetzungsprozessen geeignet. Darüber hinaus ermöglicht die Stromanalyse unter bestimmten Bedingungen die Detektion von Watertrees und das Auffinden von Teilentladungen.
Eine sinnvolle Substitution herkömmlicher TE-Messungen und eine zweckmäßige Ergänzung der Infrafrequenzprüf- und -analyseprozesse wird in der computergestützten Teilentladungsdiagnose des Kabels unter Betriebsbedingungen gesehen.

Literatur

[1] *Grönefeld, P.; von Olshausen, R.:* Tree inception and propagation in polyethylene at 0.1 Hz and 50 Hz ac voltages. 5. ISH, Braunschweig, 1987, paper 21.10
[2] Cigre-Method II-Recommended electrode system to evalutate internal pd resistance of electrical insulating materials. Cigre-paper 15-06-01 (Japan) 01-89
[3] Procedure of a long term electrical treeing test. Cigre-paper 15-06-03 (Secretariat) 86
[4] *Lemke, E.:* Zur Problematik der Ortung von Fehlerstellen in PE-Hochspannungskabeln. ELEKTRIE, Berlin 35 (1981) 7, S. 360 – 363
[5] *Lemke, E.:* A new procedure for partial discharge measurements on the basis of an electromagnetic sensor. 5. ISH, Braunschweig, 1987, paper 41.02
[6] *Kahle, M.; Neudert, E.;* u.a.: Progress in the field of pd monitoring of ageing processes of high voltage insulation. Veröffentlichung für die Cigre-Tagung, Paris, 1990, SC 15

EA 6133

Sehr geehrte Leserinnen!

Unsere Zeitschrift steht Ihnen jederzeit für Anzeigen zur Verfügung. Ihre Aufträge und Anfragen nach Media-Daten richten Sie bitte direkt an die Redaktion (Tel. 2870344).

Die Redaktion

Watertreeing bei PE/VPE-Mittelspannungskabeln

U. Laage; L. Röhr, KDT; Berlin

1. Allgemeine Situation

Praxiserfahrungen und Langzeituntersuchungen an Mittelspannungskabeln haben gezeigt, daß Wasser einen schädigenden Einfluß auf die PE- bzw. VPE-Isolierung haben kann. Mit geeigneten Färbemethoden können in solchen Isolierungen, die elektrischen Spannungsbeanspruchungen und Feuchtigkeitseinwirkungen ausgesetzt waren, bäumchenartige Strukturen festgestellt werden. Sie gehen von mikroskopisch kleinen Störstellen aus und verlaufen in Richtung der elektrischen Feldlinien. Dieses als „Watertreeing" bezeichnete Phänomen unterscheidet sich deutlich von einer durch Teilentladungen verursachten elektrischen Bäumchenbildung.

Vor etwa 20 Jahren in den USA erstmals an PE-Mittelspannungskabeln als Ursache für zahlreiche Ausfälle festgestellt, wurden seitdem in verschiedenen Ländern umfangreiche Untersuchungen zu Ursachen und Wirkmechanismen des Watertreeing (WT) unternommen. Trotz der Vielzahl der Einzelerkenntnisse gilt die Problematik heute noch immer als nicht umfassend geklärt [1].

Die anfängliche Verunsicherung der Hersteller und Anwender von PE-/VPE-Kabeln hat sich inzwischen weitestgehend gelegt, nachdem Analysen der Betriebserfahrungen und des Störgeschehens ergaben, daß qualitätsgerecht gefertigte PE- und VPE-Kabel sogar ein noch günstigeres Verhalten zeigen als die seit Jahrzehnten hervorragend bewährten Massekabel [2].

Nach wie vor jedoch wird die WT-Alterung als der dominierende Faktor für Zuverlässigkeit und Lebensdauer wasserbeeinflußter PE- und VPE-Kabelisolierungen eingeschätzt [3]. Dementsprechend groß sind die Bemühungen um eine sichere Prognose und die zuverlässige Diagnose der WT-Alterung von PE- und VPE-Starkstromkabeln.

2. Prognose der Watertree-Alterung

Die Verfahrensweise bei der Ermittlung von Lebensdauerkennlinien basiert im allgemeinen auf der Beziehung für die Durchschlagwahrscheinlichkeiten nach der Weibullverteilung. Für gleiche Durchschlagwahrscheinlichkeiten leitet man daraus die Beziehung zwischen Belastungsfeldstärke und dem Erwartungswert der Durchschlagzeit ab:

$$E^n \cdot t = \text{const.}$$

Die Lebensdauerkennlinie wird zeitgerafft unter Anwendung verschärfter Alterungsbedingungen ermittelt. Dabei wird angenommen, daß im Bereich des extrapolierten Langzeitverhaltens unter Betriebsbedingungen gleiche Durchschlagmechanismen wirken wie im Kurzzeitbereich unter Laborbedingungen.

Gerade für die WT-Alterung in PE- und VPE-Kabeln wird die Richtigkeit dieser Annahme aber stark bezweifelt.

Eine kritische Analyse beschleunigter Laboruntersuchungen zeigte wesentliche Abweichungen vom Alterungsverhalten unter Betriebsbedingungen [4]. So erforderte der überaus komplexe Charakter des WT-Phänomens eine schrittweise Annäherung der Laborprüfbedingungen an die Betriebsbedingungen.

Der hohe Aufwand für derartige Versuche und die lange Diskussion brachten es mit sich, daß repräsentative Lebensdaueruntersuchungen erst seit 1980 veröffentlicht wurden.

Wie diese Untersuchungen zeigen, unterscheiden sich die Lebensdauerkennlinien trockener und feuchter Isolierungen in charakteristischer Weise durch Verlauf und Neigung [5]. Allgemein anerkannte Versuchsbedingungen für die Durchführung von Lebensdaueruntersuchungen existieren gegenwärtig jedoch nicht, und deshalb können die vorgestellten Ergebnisse nur qualitativ verglichen werden.

Eine sinnvolle Alternative zu den konventionellen Lebensdauerversuchen ist der vergleichende WT-Test, wie er in einigen nationalen Standards enthalten ist [6] und auch von internationalen Gremien empfohlen wird [7]. Bei diesen Tests sind Vorbehandlung, Alterungsbedingungen und Auswerteverfahren genau vorgeschrieben. Nach festgelegter Alterungszeit (über 3000 h!) werden in definierter Form die elektrische Festigkeit und der Schädigungsgrad aus dem Verhältnis zur Ausgangsfestigkeit ermittelt. Zwar erhält man damit keine vollwertige Lebensdauerkennlinie, aber es kann nach Schädigungsgrad zwischen unterschiedlichen Kabeltypen quantitativ verglichen werden. Um schließlich die Prüfkriterien des WT-Tests als Maß für die Lebensdauer des feuchtigkeitsbeeinflußten Kabels nutzen zu können, bedarf es der repräsentativen Gegenüberstellung mit dem Betriebsverhalten und dem Ausfallgeschehen. Dazu liegen in der Literatur noch die wenigsten Aussagen vor, und dementsprechend hat auch die CIGRE-Arbeitsgruppe-21-11 ihre Arbeit, in diese Richtung konzentriert.

In der DDR sind seit über 15 Jahren Mittelspannungskabel mit einer Isolierung aus einem speziellen LEUNA-LDPE im Einsatz.

Die Betriebserfahrungen mit einem Streckennetz von etwa 30000 Ader-km sind bisher positiv in Hinsicht auf das WT-Problem, obwohl bei einem großen Teil der Kabel die PE-Isolierung durch mechanische Beschädigung des Mantels dem freien Zutritt von Feuchtigkeit ausgesetzt war.

Damit scheinen sich die Ergebnisse des WT-Tests am Material aus der Produktion der LEUNA-Werke zu bestätigen, das nach seinen WT-Parametern ein günstigeres Bild zeigt als vergleichbare Importprodukte. Ermittelt wurde das materialspezifische WT-Verhalten nach einer Prüfmethode, die durch *Faremo* vorgeschlagen worden war und inzwischen von der CIGRE TF 15-05-06 unterstützt wird [8].

Probenanordnung und Prüfbedingungen sind im Bild 1 dargestellt. Tafel 1 enthält die Prüfergebnisse und Mikroskopbildaufnahmen von gefärbten 250-µm-Dünnschnitten der gealterten Prüfkörper.

Deutlich zu sehen ist die wesentlich geringere WT-Dichte und WT-Länge bei LEUNA-Produkten selbst gegenüber speziellen Materialentwicklungen mit WT-retardierenden Eigenschaften.

Auch der WT-Test am Kabel nach AEIC-Standard (siehe Bild 6) erbrachte ähnlich dem Materialtest wesentlich geringere WT-Intensität bei VPE-Kabeln mit Isoliermaterial aus der LEUNA-Produktion.

Die Gegenüberstellung der WT-Dichte-Länge-Verteilung mit Angaben aus der Literatur erfolgt im Bild 2.

Insofern kann also von einer guten Übertragbarkeit der Testergebnisse ausgegangen werden. Sowohl aus den Ergebnissen des Materialtests als auch des Kabeltests (siehe Bild 3) geht andererseits allerdings hervor, daß eine klare Korrelation zwischen der Wechselspannungsfestigkeit und den WT-Parametern, wie Bow-tie-tree-Dichte, mittlere und maximale Bow-tie-tree-Länge, oder der mittleren und maximalen Vented-tree-Länge, gemessen an kleinen Probenvolumina fehlt. Offenbar werden in einem kleinen Auswertevolumen nicht die dominierenden Fehlstellen erfaßt, die zum Durchschlag führen. Dieser Mangel bei der Auswertung von WT-Strukturen äußert sich bereits bei kleinvolumigen Prüfkörpern, fällt aber noch viel stärker ins Gewicht bei realen Kabelanordnungen der üblichen Baulängen. Ein Weg zur Lösung des Problems wird durch die CIGRE-Arbeitsgruppe 21-11 mit der Begrenzung des Leistungsumsatzes im Durchschlagkanal verfolgt, wodurch eine Auswertung der WT-Parameter am Durchschlagkanal möglich wird [9]. Auch für uns werden die überdurchschnittlich guten Prüfergebnisse hinsichtlich der WT-Parameter an den eigenen Produkten nach dieser Methode zu überprüfen sein (siehe Bild 4).

3. Diagnose der Watertree-Alterung

Auf allen Gebieten der Entwicklung elektrischer Betriebsmittel mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen ist ein deutlicher Trend zur Diagnose festzustellen. Unsicherheiten bei der Bestimmung der Lebensdauer, Ausnutzung von Reserven der Betriebssicherheit nach Ablauf der nominellen Lebensdauer und schließlich die Notwendigkeit der Feststellung der Restlebensdauer zu jedem Zeitpunkt des Betriebes verleihen aussagekräftigen Diagnosemethoden zunehmende Bedeutung.

Kabeldiagnostik in Hinsicht auf eine mögliche WT-Schädigung kann schon die übliche Manteldichtigkeitsprüfung mit Gleichspannung nach IEC 240 sein. Zum Ausschluß freien Wassers im Schirm-

Dr.-Ing. *Uwe Laage* ist Entwicklungs-Ingenieur und Dr.-Ing. *Lutz Röhr* Gruppenleiter im Bereich Forschung und Entwicklung des VEB Kombinat Kabelwerk Oberspree (KWO) „Wilhelm-Pieck" Berlin.

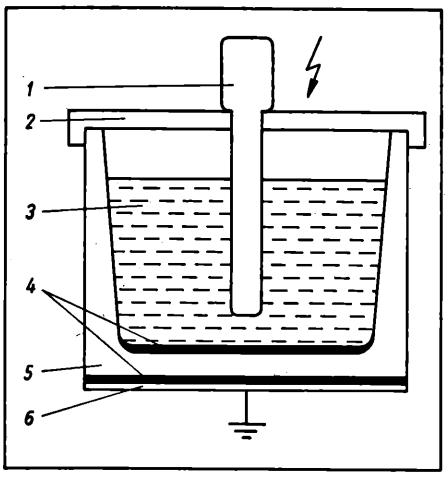


Bild 1. Watertree-Materialtest nach dem Vorschlag von *Faremo* [8]

1 Hochspannungselektrode aus Edelstahl
2 VPE-Kappe
3 Prüflösung
4 Schichten aus halbleitendem Compound
5 Probematerial Wanddicke etwa 0,7 mm
6 Aluminiumfolie auf Erdpotential
Probenherstellung:
— Ausgangsmaterial: Granulat
— Preßformung von 16 Becherproben und der HL-Schichten
— Verpressen der Komponenten und Vernetzen 30 min 180 °C
— Konditionieren 72 h 90 °C
— Stehspannungstest 50 kV/mm 1 min
Alterungsparameter:
— Prüflösung 0,01 % NaCl-Lösung
— Temperaturzyklen 16 h: 90 °C/8 h: Kühlwassertemperatur
— Alterungsdauer 500 h
— Alterungsfeldstärke 15 kV/mm
Auswertekriterien:
— Verhältnis E_D (63 %) vor und nach der Alterung
— mittlere Vt- und Btt-Länge
— mittlere Btt-Dichte

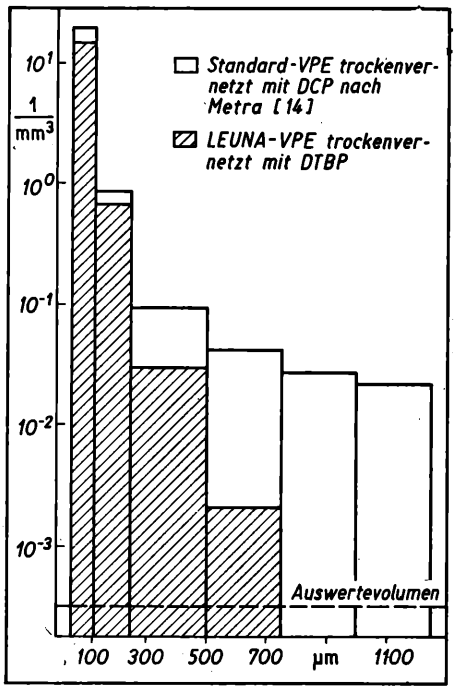


Bild 2. Länge-Dichte-Verteilung der Bow-tie-tree's nach 120 Tagen Alterung entsprechend AEIC-Standard

schraffiert:
LEUNA-VPE trockenvernetzt mit DTBP
nicht schraffiert:
Standard-VPE trockenvernetzt mit DCP nach *Metra* [14]

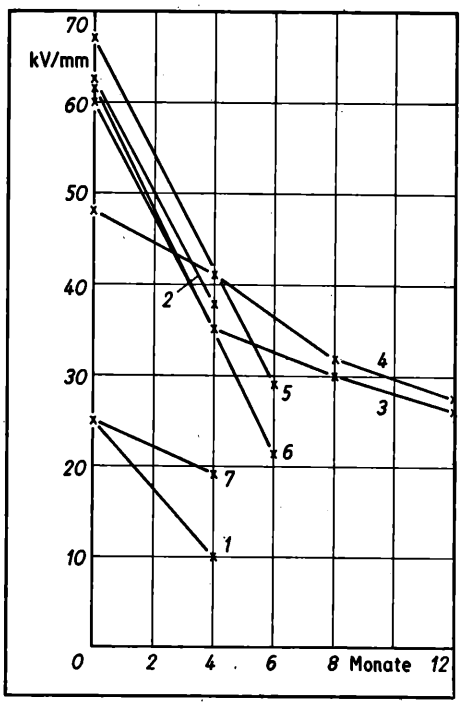


Bild 3. Wechselspannungsfestigkeit in Abhängigkeit von der Alterungsdauer bei Wassereinwirkung nach AEIC-Standard

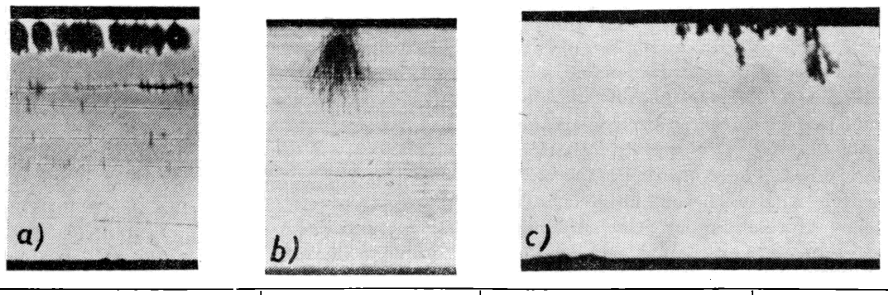
1 Forderung des AEIC-Standards
2 LEUNA-VPE, trockenvernetzt mit DTBP
3 Standard-VPE, trockenvernetzt } nach *Metra* [14]
4 WTR-VPE dampfvernetzt
5 1,25-mm-Modellkabel } nach *Katz*
6 Standard-VPE } bei RT [16]
7 Standard-VPE, dampfvernetzt (*Marsh* [17])

bereich des Kabels und zur Lokalisation der Mantelfehler lassen sich auch Kenngase sowie entsprechende Detektoren einsetzen, wie sie sich auch in der DDR in der Erprobung befinden [10].

Über den tatsächlichen WT-Alterungszustand kann endgültig aber nur eine Wechselspannungsprüfung entscheiden. Die dazu notwendige Prüftechnik ist gegenwärtig international in der Entwicklung. Praktikable Lösungen stehen jedoch noch nicht zur Verfügung. Ein Weg in Richtung auf eine zerstörungsfreie Vor-Ort-Prüfmethodik mit konventioneller Technik zur Detektion des WT-Befalls wurde in Japan gefunden [11]. Grundprinzip dabei ist die Erfassung der Absorptionsströme bei Gleichspannungsbelastung, die in Abhängigkeit von der WT-Alterung ein charakteristisches Bild liefern.

In ähnlicher Weise können langsame Relaxationsvorgänge in WT-befallenen PE/VPE-Kabelisolierungen über den Verlustwinkel bei niedrigfrequenter Prüfspannung erfaßt werden. Um den Anstieg des Verlustwinkels als Maß für die WT-Alterung bestimmen zu können, bedarf es einer leistungsfähigen Vor-Ort-Prüfanlage zur Erzeugung infrafrequenter Hochspannung mit maximaler Sinustreue. Die technische Lösung für eine derartige Prüfanlage wurde an der Technischen Hochschule Ilmenau erarbeitet und ist in einem weiteren Beitrag dieses Heftes vorgestellt. Neben der Aussage über

Bild 5. Mikroskopbildaufnahmen von gefärbten 250 µm-Dünnschichten
a) Standard-VPE DCP-vernetzt
b) WTR-VPE
c) LEUNA-VPE DTBP-vernetzt, LEUNA-PE



Tafel 1
Watertree-Kabeltest nach AEIC Standard CS 5-87

Prüfparameter (A: vor der Alterung; B: nach der Alterung)	Standard-VPE-DCP vernetzt		Kabetypen WTR-VPE		LEUNA-VPE DTBP vernetzt		LEUNA-PE	
	A	B	A	B	A	B	A	B
— Wechselspannungsfestigkeit (kV/mm)	95	50	110	84	115	67	> 120	66
— Weibullkoeffizient	6,9	8,0	8,4	10	16	7,3		7,2
— mittlere WT-Länge (µm)		160		120		130		90
— maximale WT-Länge (µm)		300		160		200		220
— Bow-tie-tree-Dichte $\left(\frac{1}{mm^3}\right)$		650		90		15		1,4

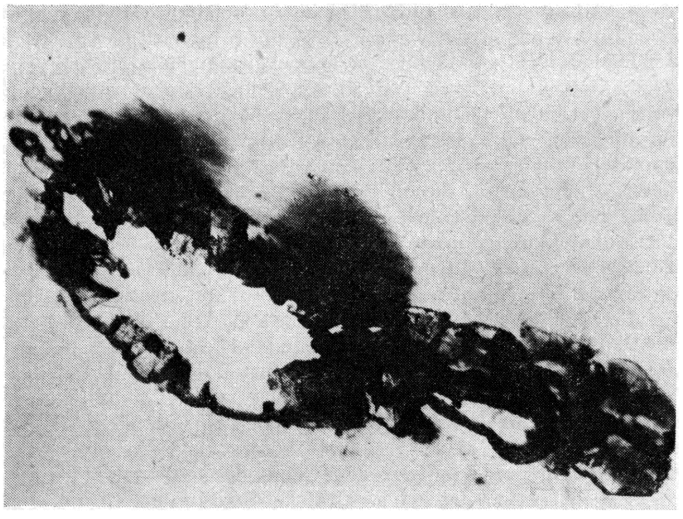


Bild 4. Watertree am Durchschlagskanal eines 10 kV-VPE-Kabels nach 120 Tagen Alterung entsprechend AEIC-Standard

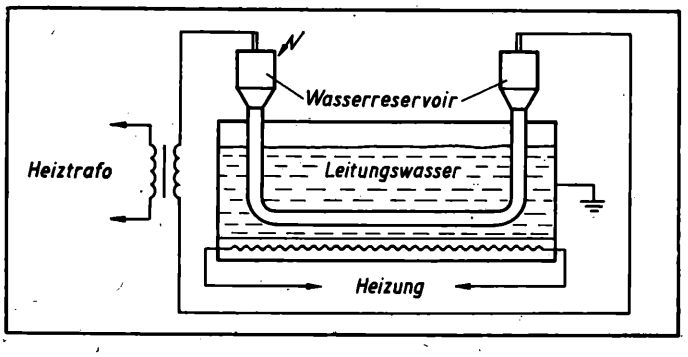


Bild 6. Watertree-Kabeltest nach AEIC-Standard CS5-87
Prüflinge: 8 × 5 m effektive Länge VPE-Einleiterkabel Typ 1 × 95 NA2XSY 6/10 kV
Vorbehandlung: 14 Heizzyklen mit 8 h; 130 °C am Leiter und 6 h: Abkühlung bei 3 U_0
Alterung: — Wasser am Schirm; Wasser im Leiter; elektrisches Feld 6 kV/mm; Heizzyklen 8 h: 90 °C; 16 h: Abkühlung; konstante Temperatur am Schirm (45 ± 5) °C; 120 Tage Alterungsdauer
Prüfkriterium: 5-min-Stufentest mit 50-Hz-Wechselspannung (Anfangsfeldstärke 4 kV/mm, Steigerungsstufen 1,5 kV/mm) geforderte minimale Durchschlagsfestigkeit nach Alterung 25 kV/mm

den WT-Befall der Isolierung, die aus dem Verlustwinkel abgeleitet werden soll folgt auch, daß es

bei unsachgemäßer Entladung Kabels nach der Prüfung oder bei Über- bzw. Durchschlägen in der Kabelanlage zu gravierenden Schädigungen der Isolierung führen kann [12]:

— Möglichkeit der unmittelbaren Gegenüberstellung von Ergebnissen der dielektrischen Messungen und einer Spannungsprüfung
— labormäßig nachgewiesene hohe Aussagefähigkeit der Hochspannungsprüfung mit Infrafrequenz hinsichtlich Teilentladungsverhalten und die Möglichkeit der TE-Erfassung mit der Analyse des Ladestromes.

Erste Ergebnisse an laborgealterten VPE-Kabeln mit einer Alterungsstufe, wie sie entsprechend Bild 6 nach 120 Tagen erreicht wird, sind positiv und die Bestätigung dieser Ergebnisse an betriebsgealterten PE-Kabeln steht für 1990 in Aussicht.

4. Schlußfolgerungen

Die ersten vom Kombinat VEB Kabelwerk Oberspree (KWO) „Wilhelm Pieck" gelieferten Mittelspannungs-PE/VPE-Kabel haben jetzt fast 50 % der Nenn-Nutzungsdauer von 50 Jahren absolviert. In Übereinstimmung mit den Laborprüfergebnissen zeigen die praktischen Betriebserfahrungen keine Tendenzen zur Einschränkung der Zuverlässigkeit oder der Lebensdauer durch Watertreeing. Durch entsprechend sorgfältige Fertigung und Verwendung geeigneter PE-Qualitäten ist eine Gefährdung der Mittelspannungskabel offensichtlich auf Dauer zuverlässig vermeidbar.
Aus dieser Erfahrung heraus sind solche Maßnahmen, wie

— Einsatz von PE-Mischungen mit Watertree-retardierenden Eigenschaften (WTR-PE-Compounde) [13]
— Hermetisierung der Kabel durch Längs- und Quer-Wassersperren [15]
— völlige Ablösung von PE durch EPR-Compounde [14] zumindest im Mittelspannungsbereich techn.-ökonomisch nicht begründbar.

Unabhängig davon sollten zur Einschränkung des immer verbleibenden Restrisikos zuverlässige Prüf- und Diagnoseverfahren für folgende Aufgaben weiterentwickelt werden:

— zeitraffende Laborprüfverfahren zur Auswahl von PE-Qualitäten und auch von Konstruktionsvarianten unter Berücksichtigung der Watertree-Effekte.
— Diagnose-Prüfverfahren für Kabel im Netz zur Bewertung ihres Alterungs-Zustandes und zur Abschätzung der zu erwartenden Restlebensdauer.

An beiden Aufgaben wird gegenwärtig u.a. auch in der DDR intensiv gearbeitet.

Literatur

[1] *Metra, P.:* Watertreeing in cables with extruded insulation. On behalf of the CIGRE WG 21-11. Conf. Rep. CIRED 1989
[2] *Wanser, G.:* Bericht über die Arbeitssitzung 3: Kabel und Leitungen. Elektrizitätswirtschaft 86 (1987) 18, S. 769–774
[3] *Jinno, M.;* et al.: Present condition of XLPE cables used in Japan and cable fault analysis. Conf. Rep. JICABLE 1987, S. 477–483
[4] *Steenis, E. F.;* et al.: Accelerated aging to predict water tree behaviour in extruded cables. Conf. Rep. JICABLE 1987, S. 161–167
[5] *Naybour, R. D.:* The influence of water on the live of polymeric insulated cables. Conf. Rep. Sec. Conf. on power cables and accessories at 10 kV to 180 kV, London (1986), S. 134–138
[6] AEIC CS 5–87. Okt. 1987. 9. Aufl. Spezifikation für Starkstromkabel 5 bis 35 kV mit thermoplastischer und vernetzter Polyäthylenisolierung
[7] *Kalkner, W.;* u.a.: Watertreeing in PE and XLPE insulated high voltage cables. CIGRE-Bericht 21-07/1982
[8] *Faremo, H.:* Growth of watertrees and their influence upon the breakdown strength of EPR materials. Conf. Rep. JICABLE 1987, S. 193–198
[9] *Steenis, E. F.;* et al.: Characterization test and classification procedure for watertree-aged medium voltage cables. Elektra 125 (1989) 7, S. 89–101
[10] DD-WP 3150666. Pneumatisches Verfahren zur Dichtigkeitsprüfung an Plasthüllen nichtlängswasserdichter Kabel
[11] *Hirata, T.;* et al.: Diagnostic methods for high voltage XLPE insulated cable in the field. Conf. Rep. JICABLE 1987, S. 463–470
[12] *Peschke, E.:* Spannungsprüfung an Kabelanlagen. Elektrizitätswirtschaft 85 (1986) 18, S. 691–692
[13] *Peschke, E.:* Vergleichende Prüfung zur Bewertung von VPE-WTR-Kabeln. Elektrizitätswirtschaft 87 (1988), S. 384
[14] *Farneti, F.;* et al.: Characterization on extruded insulation cables with respect to effects of water. Conf. Rep. JICABLE 1987, S. 187–192
[15] *Grosser, B. K.;* et al.: Water impervious „on-Jacket" moiture barrier cable. Conf. Rep. JICABLE 1987, S. 324–331
[16] *Katz, C.;* et al.: Characterization of the degree of cable aging by a dual polarity breakdown test method. Conf. Rep. JICABLE 1987, S. 451–456
[17] *Marsch, T.;* et al.: Long term aging of water immersed XLPE insulation. Conf. Rep. JICABLE 1987, S. 181–186

EA 6127

Technologietransfer-Seite im Elektronik-Journal München

Das Elektronik-Journal München plant die Einrichtung einer regelmäßigen Technologietransfer-Seite. Dabei wird **DDR-Firmen** aus den Bereichen Elektronik, Elektrotechnik und aus angrenzenden Gebieten (z.B. Maschinenbau, Meß- und Automatisierungstechnik) ab sofort die Möglichkeit eingeräumt, Kooperationsgesuche direkt an das Elektronik-Journal zu senden. Diese werden dann mit Kennziffer **kostenlos** veröffentlicht und daraufhin dem Journal zugehende Reaktionen ebenfalls **kostenlos** an die Firmen in der DDR weitergeleitet.

Mindestens folgende Angaben sollten enthalten sein:
— genauer Kooperationswunsch (Fachgebiet, Dauer usw.)
— Grundinformationen zum Unternehmen einschließlich Adresse, Telefon-Nr. usw.

Ihre Kooperationsgesuche richten Sie bitte an:
Elektronik-Journal
Fr. Ariane Rüdiger, Redakteurin
Europa-Fachpresse-Verlag GmbH
Thomas-Dehler-Str. 27
D-8000 München 83.

Neue Hochtemperatur-Supraleiter können für die Starkstromtechnik interessant werden

G. Heidmann, KDT, Berlin

Mit der sensationellen Entdeckung der neuen Hochtemperatur-Supraleiter im Jahre 1986 wurde das Interesse an der Supraleitung ganz neu geweckt.

Das wird verständlich, wenn die im Bild 1 dargestellte historische Entwicklung der Sprungtemperaturen seit der Entdeckung der Supraleitung an Quecksilber im Jahre 1911 betrachtet wird. Durch das Anwachsen der Sprungtemperaturen auf Werte weit über der Temperatur des flüssigen Stickstoffs (77 K), wobei selbst Raumtemperatur nicht mehr für unmöglich gehalten wird, werden neue vorteilhafte Anwendungen in vielen Bereichen der Technik, auch in der Starkstromtechnik, erwartet, die mit den klassischen Supraleitern nicht möglich sind.

Ein idealer Supraleiter ist bekanntlich durch das Verschwinden des spezifischen elektrischen Widerstandes unterhalb seiner kritischen Temperatur (Sprungtemperatur) gekennzeichnet, wobei gleichzeitig vollkommener Diamagnetismus (Suszeptibilität $\varkappa = -1$) auftritt [1]. Für die Starkstromtechnik wird ein Supraleiter als Leitermaterial aber erst dann interessant, wenn diese Eigenschaften auch in hohen externen Magnetfeldern, besonders auch in Wechselfeldern, sowie beim Fließen großer Transportströme erhalten bleiben. Darüber hinaus muß ein Supraleiter ökonomisch in technisch handhabbaren Formen hergestellt werden können.

Die bereits 1911 entdeckten metallischen Supraleiter Quecksilber (Hg) und Blei (Pb) sind, wie alle Typ-1-Supraleiter für starkstromtechnische Anwendung ungeeignet. Bereits relativ schwache magnetische Felder (wenige 10 hoch minus 2 Tesla) zerstören ihren supraleitenden Zustand.

Mehr als 50 Jahre intensiver Grundlagenforschung waren erforderlich, um ein Verständnis des Phänomens Supraleitung zu erreichen, das eine gezielte Entwicklung von Supraleitern für den technischen Gebrauch ermöglichte. Mit den harten Supraleitern (Typ-3-Supraleiter) standen dann erstmalig in den sechziger Jahren Leitermaterialien zur Verfügung, die bei entsprechender metallurgischer Behandlung in der Lage sind, hohe Gleichströme auch in hohen externen Magnetfeldern (z.B. 10 hoch 3 A/mm hoch 2 bei 5 Tesla) verlustlos zu tragen.

Die niedrigen kritischen Temperaturen, z.B. bei Niob-Titan (NbTi) 9,5 K und bei Niob-Zinn (Nb3Sn) 18,7 K, erfordern aber eine teure Kühlung mit verflüssigtem Helium im Temperaturbereich bis etwa 10 K. Damit bedingt die Anwendung der Supraleitung in jedem Fall zusätzliche Erzeugniskomponenten in Form des Kühlmittels, der Kältemaschinen und der hochwertigen thermischen Isolierung, so daß notwendigerweise wirtschaftliche Leistungsgrenzen existieren, unterhalb derer eine Anwendung im Vergleich mit Normalleitern unökonomisch ist.

Die Typ-3-Supraleiter fanden eine sich rasch verbreitende Anwendung beim Bau von Magneten für die Hochenergiephysik; dabei traten erhebliche Einsparungen von Betriebs- und Baukosten ein.

Die sich verbessernde Qualität der Supraleiter und ihre wachsende industrielle Verfügbarkeit führten in den siebziger Jahren zu einer Vielzahl von Studien und Projekten auch im Bereich der Starkstromtechnik (rotierende Maschinen, Kabel, Schalter usw.). Hierbei wurden im wesentlichen zwei Aspekte gesehen:

Verbesserung der Leistungsfähigkeit herkömmlicher Anlagen im Hinblick auf Wirkungsgrad, Volumen, Masse und Wirtschaftlichkeit sowie die Realisierung völlig neuer Lösungen energietechnischer Probleme, die mit konventionellen Mitteln aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht zu realisieren sind (z.B. induktive Speicherung von Energie, magnetohydrodynamische Energiewandlung usw.).

Eindeutige Schwerpunkte waren hier Synchrongeneratoren mit supraleitender Erregerwicklung und supraleitende Starkstromkabel.

Eine umfassende Übersicht über diese weltweit durchgeführten Arbeiten ist in [2] enthalten, während in [3] der zu dieser Zeit in der DDR erreichte Erkenntnisstand zusammengefaßt ist.

Trotz vielfach erfolgreicher Prototyplösungen insbesondere auch von supraleitenden Starkstromkabeln hat eine Produktionseinführung von supraleitenden Erzeugnissen im Bereich der Starkstromtechnik bisher nirgend stattgefunden. Die wirtschaftlichen Leistungsgrenzen für diese Geräte und Anlagen liegen teilweise so hoch, daß in vielen Fällen, so auch in der DDR, eine Einstellung der Entwicklungsprojekte erfolgte. In anderen Fällen, z.B. bei Turbogeneratoren und magnetischer Separation ist gleichfalls die teure und relativ aufwendige Kühltechnik mit flüssigem Helium für die zögerliche Anwendung verantwortlich, die bisher nur zum Bau einzelner Prototypen geführt hat [4]. Fest etabliert hat sich dagegen die Supraleitung in einigen Gebieten des Magnetbaus, insbesondere in der Physik und der Medizin.

Dabei werden fast ausschließlich Nb-Ti- und Nb3-Sn-Multifilamentleiter verwendet.

Die Werkstoffentwicklung auf dem Gebiet der neuen Hochtemperatur-Supraleiter befindet sich weltweit im Stadium der Grundlagenforschung. Diese Supraleiter sind den Keramiken zuzuordnen und besitzen somit, abgesehen von der elektrischen Leitfähigkeit, wenig Gemeinsamkeiten mit den bisher bekannten Leitermaterialien. Wegen ihrer Schichtstruktur sind sie sämtlich stark anisotrop. Die supraleitenden Eigenschaften (kritische Stromdichte und kritische Flußdichte) sind innerhalb von bestimmten Raumrichtungen wesentlich besser als senkrecht dazu. Dadurch sind möglicherweise Anwendungsfälle erschließbar, für die heute noch technische Vorstellungen fehlen. Zusätzlich treten neue Begrenzungsmechanismen für den supraleitenden Stromtransport auf, vor allem wenn diese Supraleiter in Form von massivem Material (z.B. Drähte) hergestellt werden [4]. Das Fehlen des quantitativen theoretischen Verständnisses über die der Hochtemperatur-Supraleitung zugrunde liegenden Elementarprozesse gestattet z.Z. noch keine Abschätzungen erreichbarer Parameter für diese Supraleiter.

Mit dem Auffinden der Materialsysteme Y-Ba-Cu-O mit Tc = 92 K Bi-Sr-Ca-Cu-O mit Tc = 110 K und Tl-Ba-Ca-Cu-O mit Tc = 125 K liegen die kritischen Temperaturen derzeit weit oberhalb der Temperatur des flüssigen Stickstoffs (77 K). Damit kann als Kühlmittel flüssiger Stickstoff verwendet werden, wodurch sich der Aufwand und die Kosten für die Kühlung erheblich reduzieren und die wirtschaftlichen Leistungsgrenzen für bestimmte Anwendungen sinken. Zudem ist flüssiger Stickstoff einfacher zu handhaben und besser verfügbar als das Edelgas Helium.

Es wurde auch gezeigt, daß diese Supraleiter hohe kritische Flußdichten zulassen (> 10 Tesla bei 77 K), womit ein Einsatz im Zusammenhang mit hohen Magnetfeldern möglich ist.

Der Nachweis ausreichend hoher kritischer Stromdichten ist allerdings bisher nur an epitaxial aufgewachsenen dünnen Schichten bzw. an Einkristallen gelungen.

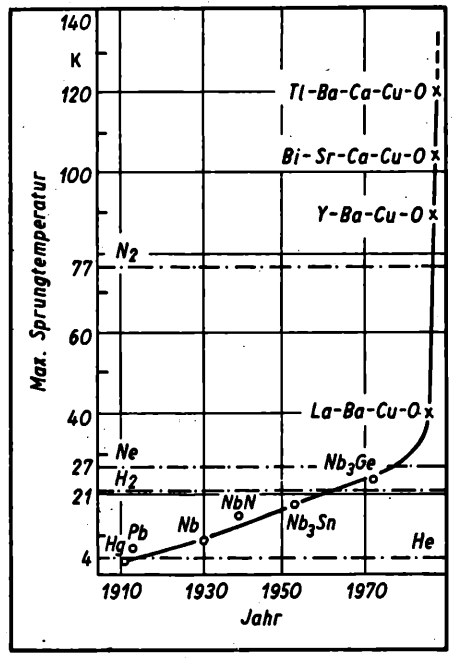


Bild 1
Historische Entwicklung der max. Sprungtemperaturen von Supraleitermaterialien

• metallische Supraleiter (klassische S L)
× keramische Supraleiter (Hochtemperatur-Supraleiter)

— · — · — Siedetemperaturen von Helium (He), Wasserstoff (H_2), Neon (Ne) und Stickstoff (N_2), die als Kühlmittel in Frage kommen.

Dr. rer. nat. *Gerd Heidmann* ist Gruppenleiter im Bereich Forschung und Entwicklung des VEB Kombinat Kabelwerk Oberspree (KWO) „WilhelmPieck".

Pulvermetallurgisch oder durch Sprühverfahren hergestelltes polykristallines Material in Draht- oder Bandform, wie es für Anwendungen in der Starkstromtechnik in Frage kommt, hat noch keine ausreichende Stromtragfähigkeit. Die angegebenen Werte liegen zwischen etwa 4×10 hoch 3 A/cm hoch 2 für das Y-System und einigen 10 hoch 4 A/cm hoch 2 für das hochgiftige Tl-System. Angaben zu den auftretenden Wechselfeldverlusten liegen noch nicht vor.

Über erste Erfolge bei der Herstellung langgestreckter Leiter wurde bereits berichtet [4]. Hierzu wurde das Supraleitermaterial als Pulver in ein Silberrohr eingefüllt und der Verbund durch Walzen und Ziehen zum Draht umgeformt. Es muß aber eingeschätzt werden, daß sich mit den bisher verwendeten Herstellungsprozessen ohne aufwendige Modifikationen keine langen Drähte oder Bänder mit der geforderten hohen Stromtragfähigkeit herstellen lassen. Es bleibt daher noch zu klären, ob geeignete, mit flüssigem Stickstoff gekühlte Leiter hoher Stromtragfähigkeit mit guten Verarbeitungseigenschaften und ausreichender mechanischer Belastbarkeit herstellbar sind.

Die bisherigen Ergebnisse lassen aber auf weitere Verbesserungen hoffen. Daher ist es durchaus sinnvoll, zum jetzigen Zeitpunkt eine objektive Bewertung der Anwendungsmöglichkeiten unter Verwendung früherer Erkenntnisse auch für die Starkstromtechnik vorzunehmen.

Daran wird gegenwärtig international — auch in der DDR — intensiv gearbeitet.

Literatur

[1] *Buckel, W.:* Supraleitung, Grundlagen und Anwendungen. Berlin: Akademie-Verlag 1973

[2] *Foner, S.; Schwartz, B. B.* (Ed.): Superconducting Machines and Devices. New York and London: Plenum Press 1974

[3] Beiträge aus der Kryotechnik. ELEKTRIE, Berlin 31 (1977) 11, S. 583–612 und ELEKTRIE, Berlin 31 (1977) 12, S. 645–661

[4] *Krauth, H.:* Technische Supraleiter für die Magnet- und Energietechnik, etz 110 (1989) 13, S. 656–659

EA 6128

FACHTAGUNGEN

Meeting des Technischen Komitees „Rotierende elektrische Maschinen" (TC2) der Internationalen Elektronischen Kommission (IEC)

Vom 26. bis 28. September 1989 fand in Frankfurt/Main routinemäßig (im Turnus von 2 Jahren nach dem Meeting in Sydney im Oktober 1987, siehe ELEKTRIE 42 (1988) 6, eine Tagung des TC2 statt. Sie wurde von 35 Delegierten besucht, die 17 Nationalkomitees vertraten. Den Vorsitz führte Mr. *Timberlake*, Großbritannien.

Arbeit der Subkomitees

Dem TC2 waren zum Zeitpunkt der Tagung folgende Subkomitees zugeordnet:

- SC 2A (Turbogeneratoren)
- SC 2B (Reihen von Montageabmessungen und Nennleistungen)
- SC 2G (Methoden und Verfahren für die Prüfung)
- SC 2H (Schutzarten von Gehäusen, Kühlverfahren und Bauformen)
- SC 2J (Klassifizierung der Isolierungssysteme)

Das Subkomitee 2A konnte nach Veröffentlichung der neuen Ausgabe der Publikation 34-3 (Nenndaten und Kennwerte von Dreiphasen-Turbogeneratoren für 50 Hz) keine von den Nationalkomitees getragene Konzeption für neue Aufgabenstellungen entwickeln. Das gilt insbesondere auch für den Komplex der Zuverlässigkeitsparameter. Diese Arbeit soll erst wieder aufgeriffen werden, wenn Ergebnisse der Studiengruppe 11 der CIGRE vorliegen. Aus diesem Grunde wurde von der mit den neuen Verfahrensregelungen gegebenen Möglichkeit Gebrauch gemacht, das SC 2A in den sogenannten Standby-Status zu überführen. Der Status ist dadurch gekennzeichnet, daß Vorsitzender und Sekretär die Arbeit weiterführen, aber keine Tagungen stattfinden, solange nicht eine Reaktivierung erfolgt.

Das Subkomitee 2B hat die Überarbeitung der Publikation 72 und 72A über Abmessungen und Nennleistungen von elektrischen Maschinen nach Vorliegen positiver Abstimmungsergebnisse zu entsprechenden Dokumenten in der 6-Monate-Regel weitgehend abgeschlossen. Die Veröffentlichung erfolgt bis Ende 1990, und zwar nunmehr unter den Bezeichnungen Publikation 72-1 und Publikation 72-2. Da keine weiteren Aufgaben gesehen werden, wurde entschieden, das Subkomitee nach Erscheinen der Publikationen 72-1 und 72-2 von seiner Arbeit zu entbinden. In Zukunft erforderliche Arbeiten an den Publikationen, die vom SC 2B erarbeitet wurden, werden dann unmittelbar durch TC2 geführt.

Das Subkomitee 2G hat seine Arbeit reaktivieren können. Das bis zur Stufe der 6-Monate-Regel gelaufene Projekt über die Messung der Verluste aus dem Auslaufversuch wird als Ergänzung zur bestehenden Ausgabe der Publikation 34-2 erscheinen. Die zu erwartenden Ergebnisse der beiden Arbeitsgruppen (WG 2 — spezielle Prüfverfahren für Asynchronmaschinen bei Netz- und Umrichterspeisung und WG 3 — spezielle Prüfverfahren für Gleichstrommaschinen) sollen in einem neuen Teil der Publikation 34 etwa unter dem Titel „Spezielle Prüfverfahren für elektrische Maschinen" erscheinen.

Das Subkomitee 2H sieht als zukünftige Aufgabe die Vorbereitung einer 3. Ausgabe der Publikation 34-5 (Klassifizierung der durch die Gehäuse rotierender Maschinen gewährleisteten Schutzgrade). Eine derartige Überarbeitung wird dadurch erforderlich, daß von seiten des TC 70 eine Reihe wesentlicher Änderungen in der Publikation 529 (Klassifizierung der durch Kapselung erzielten Schutzgrade), dem Grundstandard über Fragen des Schutzgrades, vorgenommen worden sind.

Das Subkomitee 2J als jüngstes SC des TC2 hat die Aufgabe, untersetzende Publikationen für rotierende elektrische Maschinen auf der Grundlage der Publikation 505 (Leitfaden für die Bewertung und Bestimmung von Isoliersystemen elektrischer Ausrüstungen) zu erarbeiten. Die anfänglich guten Fortschritte in der Arbeit dieses Subkomitees gerieten durch Pensionierung des Vorsitzenden und Schwierigkeiten bei der Neubesetzung des Sekretärs in Verzug. Nachdem diese Probleme vor kurzer Zeit gelöst wurden, ist die Arbeit wieder in Gang gekommen und auch bereits das nächste Meeting des Subkomitees für März 1990 angekündigt. Das Subkomitee hat im Verlauf des Jahres 1987 folgende drei Dokumente unter der 6-Monate-Regel zirkuliert:

Funktionelle Bewertung von Isoliersystemen für rotierende elektrische Maschinen

- Teil 1: Allgemeine Richtlinien
- Teil 2-1: Prüfverfahren für Drahtwicklungen — thermische Bewertung und Klassifizierung
- Teil 3-1: Prüfverfahren für Formspulenwicklungen — thermische Bewertung und Klassifizierung

Die auf der Tagung in Frankfurt/Main vom Vorsitzenden und Sekretär des SC 2J vorgelegten Berichte wiesen aus, daß die Abstimmungsergebnisse zu diesen Dokumenten so positiv sind, daß die Veröffentlichung der ersten beiden unmittelbar empfohlen werden kann und das dritte nach Durchlauf eines zusätzlichen Dokuments im 2-Monate-Verfahren. Weiterhin wurden die Nationalkomitees aufgefordert, in einem Fragespiegel mögliche Richtungen der weiteren Arbeit des Subkomitees zu nennen. In der Bearbeitung befinden sich weitere Teile der Publikation, betreffend die elektrische Beanspruchung und die gemischt elektrische und thermische Beanspruchung.

Projekte zur Weiterentwicklung der Publikation 34-1 (Rotierende elektrische Maschinen, Nennwerte und Betriebsverhalten)

Die Arbeit an der Publikation 34-1 wird stets als Schwerpunkt der Aufgaben des TC2 gesehen. Dementsprechend nimmt die diesem Komplex zugeordnete Arbeitsgruppe (WG 12) eine zentrale Stellung ein. Die vorliegenden Ergebnisse wurden als 2. Ergän-

zung zur 8. Ausgabe der Publikation 34-1 noch 1989 veröffentlicht. Die weiteren Vorhaben werden unter dem Aspekt der Vorbereitung einer 9. Ausgabe dieser Publikation verfolgt.
Es sind dies vor allem:

- Neufassung der Sektion 10 (Leistungsschilder)
  Die Arbeiten haben dabei einen solchen Stand erreicht, daß auf dem Meeting entschieden wurde, ein Dokument unter der 6-Monate-Regel in Umlauf zu setzen.
- Einführung einer neuen Betriebsart S 10 (Betriebsart mit diskreten konstanten Belastungen). Mit der neuen Betriebsart wird es möglich, zeitweilige Überlastungen, d.h. ein zeitweiliges Überschreiten der zulässigen Temperaturen bzw. Übertemperaturen nach den Tafeln I bis III der Publikation 34-1 unter Angabe des Einflusses auf die Lebensdauer zuzulassen. Die zwischenzeitlich bereits durch die WG 12 erarbeitete Neufassung soll unter dem sogenannten beschleunigten Verfahren zirkuliert werden, um die neue Betriebsart noch in die 9. Ausgabe der Publikation 34-1 aufnehmen zu können.

Projekte, die weitere Publikationen des TC2 betreffen

Die weitere Arbeit an der Publikation 34-16 über Erregersysteme durch die WG 16 findet keine starke Unterstützung von seiten der Nationalkomitees. Der Stand läßt sich wie folgt kennzeichnen:

- Der Abschnitt 3 (Kleinsignalverhalten) wird als neues Sekretariatsdokument herauskommen.
- Der ursprünglich vorgesehene Abschnitt 4 über Anforderungen wird nicht weiter bearbeitet.
- Der Abschnitt 5 über Funktionsprüfungen erfährt eine Weiterbearbeitung.

Der vorliegende Entwurf für einen Leitfaden für die Anwendung von Kurzschlußläufermotoren bei Umrichterspeisung, den die WG 12 erarbeitet hat, wurde entschieden, als Dokument unter der 6-Monate-Regel herausgegeben zu werden.
Die Arbeiten zur Vorbereitung von Publikationen über Schrittmotoren und Stellmotoren durch die WG 22 haben zu gewissen Entscheidungen über die Klassifizierung geführt. Es wurde als notwendig erkannt zu prüfen, inwieweit in die Arbeit der WG 22 auch spezifische elektronische Komponenten vor allem für Positionierantriebe einzubeziehen sind.
Die Publikation 34-15 über Impulsspannungsfestigkeit ist angekündigt.
Mit der Entscheidung über die Herausgabe der Publikation, die Festlegungen über Stehspannungen mit Stirnsteilheiten von 1,2 µs trifft, wurde die zuständige WG 15 gleichzeitig beauftragt, eine Ergänzung zu entwickeln, die Aussagen für den Bereich von Impulsspannungen mit kürzeren Anstiegszeiten macht. Auf ein entsprechendes Sekretariatsdokument ist eine solche Vielzahl von Stellungnahmen eingegangen, daß weitere Beratungen der Arbeitsgruppe erforderlich werden und die Herausgabe eines Dokuments unter der 6-Monate-Regel erst nach der nächsten Tagung des TC2 möglich sein wird.
Die Vorbereitung von Publikationen über Generatorsätze mit Kolbenkraftmaschinen erfolgt durch die WG 19 und WG 20. Der als Sekretariatsdokument vorliegende Entwurf der WG 19 ignoriert die neue Betriebsart S 10, deren Einführung eigentlich gerade aus der Sicht der Aggregate ausgelöst worden war und operiert nach wie vor allein mit dem Begriff peak rated output. Es wurde deshalb entschieden, daß ein neues Sekretariatsdokument zu erarbeiten ist.
Die WG 20 war im Ergebnis des Meetings in Sydney 1987 gebildet worden mit der Aufgabe, zulässige Werte für erzwungene Schwingungen von Generatoren, die durch Kolbenkraftmaschinen angetrieben werden, zu fixieren. Es mußte festgestellt werden, daß die Arbeitsgruppe offensichtlich kaum wirksam geworden ist.
Die Überarbeitung der Publikation 50(411) IEV (Internationales Wörterbuch) hat sich als äußerst aufwendig herausgestellt. Für erste Teile der Überarbeitung liegen die Ergebnisse der Zirkulation unter der 6-Monate-Regel unterdessen beim für die weitere Arbeit zuständigen TC 1. Die Notwendigkeit der Aufnahme von Begriffen für kleine Maschinen, insbesondere für Schritt- und Stellmotoren, wurde erkannt. Es wurde auf die Nutzung entsprechender Fortschritte in der Arbeit der WG 22 orientiert.
Die Neufassung der Publikation 34-9 (Geräuschgrenzwerte), die durch die WG 14 vorbereitet wurde, erschien im März 1990. Ursprünglich sollte die WG 14 danach von allen Aufgaben entbunden werden. Diese Entscheidung wird jedoch nunmehr von der Rückäußerung der Nationalkomitees auf einen von den USA angekündigten Vorschlag abhängig gemacht, der die Fixierung von Grenzwerten für Lastgeräusche und Geräusche bei Umrichterspeisung beinhaltet.

Vorschläge für neue Arbeitsaufgaben

Auf der Grundlage eines entsprechenden Vorschlags der BRD, der die Erweiterung der Publikation 34-14 hinsichtlich der Grenzwerte von Schwingungen für Baugrößen oberhalb 400 mm betrifft, wird der Sekretär des TC 2 eine Aufgabenstellung erarbeiten und als Sekretariatsdokument zirkulieren lassen. Im Falle der Zustimmung der Nationalkomitees ist beabsichtigt, eine entsprechende Arbeitsgruppe zu bilden.
Ausgehend von einem Vorschlag Großbritanniens wird eine Reihe von Aufgaben im Zusammenhang mit der Umrichterspeisung von Asynchronmaschinen gesehen.
Sie betreffen u.a.

- die Festlegung der Nennspannung und ihre Messung bei Umrichterbetrieb
- die Anforderungen an die Impulsspannungsfestigkeit bei Umrichterbetrieb.

Es wurde entschieden, keine neue Arbeitsgruppe zu bilden, sondern die einzelnen Probleme den bestehenden Arbeitsgruppen des TC2 sowie seiner Subkomitees zuzuordnen. Ein entsprechender Vorschlag wird durch den Sekretär des TC2 erarbeitet. Das nächste Meeting des TC2 wird wiederum nach etwa 2 Jahren, d.h. im III. Quartal 1991, stattfinden. Die Arbeit in der Zwischenzeit wird maßgebend durch die neuen Verfahrensregeln beeinflußt werden, die im Februar 1990 in Kraft traten.

G. Müller, Dresden EK 4133

KURZBERICHTE

LWL-Markt für das Teilnehmeranschlußnetz der USA

Für das Teilnehmeranschlußnetz der USA stellte *Gregory A. Perry*, Präsident der American Fiberoptic Technology Tucker, GA/USA, im Wire Journal International 22 (1989) 10 für den potentionellen US-Markt folgende Kalkulation auf:

— In den USA haben von den 92 Millionen Haushalten etwa 85,7 Millionen ein Telefon
— Im Geschäftsbereich werden 35 Millionen Telefone betrieben.
— Ausgehend von einer mittleren Anschlußlänge von 2 km, einem Einsatz von 2 LWL in den Anschlußkabeln, einem Anschluß je Haushalt, 2 Anschlüssen je Geschäftsbereich und einer Lebensdauer von 20 Jahren ergibt sich ein jährlicher Bedarf von 29,9 Millionen Faserkm.

Perry stellt fest, daß die Fertigungskapazität der USA für diesen Bedarf nicht ausreicht. So ergibt sich die Frage: Woher sollen die erforderlichen LWL kommen? In diesem Zusammenhang wird festgestellt, daß nur Japan und Südkorea derzeit LWL-Fertigungskapazitäten in der Größenordnung von Tausend-km besitzen. Speziell für Japan wird folgende Kapazitätsentwicklung 1986/91 prognostiziert (s. Tafel 1).
In Europa weisen nur wenige Länder Prognosen der LWL-Fertigungskapazitäten in der Größenordnung von Tkm aus (s. Tafel 2).

Tafel 1. Prognose der Kapazitätsentwicklung für LWL in Tausend-km (Tkm)

	1986	1991
Quarz-Multimode SI-LWL	6,3	6,3
Quarz-Multimode GI-LWL	240,0	3500,0
Quarz-Monomode LWL	340,0	1200,0
Mehrfachkomp. Multimode SI-LWL	2,5	2,5
Festpolarisierte LWL	0,07	0,33
Gesamt	588,87	4709,13

Tafel 2. Prognose der LWL-Fertigungskapazitäten in Tausend-km (Tkm) für das Jahr 1993

Großbritannien	625
Bundesrepublik Deutschland	230
Niederlande	160
Frankreich	75
Italien	75
Schweden	40
Dänemark	30
Schweiz	5

R. Grundig, Berlin EK 4117

PATENTE

Hochspannungskabel mit Überwachungselementen

DD-WP-Az: 311 499-2
Int.-Cl.: H 01 B
Anmeldetag: 28. 12. 1987
Erfinder: *L. Röhr; U. Laage; H. Vogel*

Die Erfindung betrifft ein Hochspannungskabel mit Überwachungselementen und Plastisolierung, bei dem eingedrungene Feuchtigkeit zur Anzeige gebracht wird.
Das Hochspannungskabel mit mindestens einem Energieleiter, einer Leiterisolierung und einem Außenbereich bestehend aus Kabelmantel und darunter liegenden Elementen, wie Schirm, Bewicklung oder Bewehrung enthält Lichtwellenleiter (LWL) oder mehradrige LWL-Leitungen als Sensoren. Diese Überwachungselemente bestehen aus flourfreien Multimode-Quarzlichtwellenleitern mit feuchtigkeitssensitiven Dotierungsstoffen ohne geschlossener Faserbeschichtung zur Dämpfungsmessung vorzugsweise im Außenbereich des Kabels. Der Quarz-Lichtwellenleiter ist mit Germanium oder Phosphor dotiert.
Bei Einwirkung von Feuchtigkeit erhöht sich die Dämpfung des LWL; bei lokaler Einwirkung ist eine Ortung der Fehlerstelle möglich.

G. Dürnbach, Berlin EK 4120

Beschichtung für eine optische Faser der Lichtwellenübertragung

DD-WP: 264 355
Int.-Cl.: G 02 B — 6/44
Anmeldetag: 01. 08. 1984
Erfinder: *F. Schimke, J. Böhm, R. Bast*

Beschichtung für eine optische Faser der Lichtwellenübertragung, die vorzugsweise als Sekundärbeschichtung fungiert. Ziel der Erfindung ist ein Beschichtungsmaterial, das der optischen Faser einen ausreichenden mechanischen Schutz bietet.
Aufgabengemäß besteht die Beschichtung aus ataktisch amorphen Polymeren.
Erfindungsgemäß besteht die Beschichtung aus einem Compound von Acrylnitril-Styrol-Polymerisat und Kautschukpolymerisat bzw. Pfropfpolymerisat von Acrylnitril- und Styrol auf Kautschukpolymerisat. Zusätzlich kann die Abmischung aus ABS-Werkstoffen und PUR-Elastomeren bestehen, hierbei sind 100 Gewichtsteile Acrylnitril-Butadien-Styrol- oder Acrylnitril-Butadien/Acrylester-Styrol- oder Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Formmasse mit 2 bis 90 Gewichtsteilen, vorzugsweise 40 bis 70 Gewichtsteile, eines thermoplastisch verarbeitbaren Polyurethanelastomeren mit einer Härte im Bereich von 60 Shore A bis 80 Shore D, vorzugsweise 60 Shore A bis 98 Shore A, abgemischt.

G. Dürnbach, Berlin EK 4122

DISSERTATIONEN

Zur Lebensdauer von Polyethylen-Kabelisolierungen bei gleichzeitiger thermischer und elektrischer Belastung mit Wechselspannung

Dissertation A, TU Dresden 1989
Von *C. S. Li*

Gutachter:
Doz. Dr. sc. techn. *M. Eberhardt*, TU Dresden
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. *W. Mosch*, TU Dresden
Dr.-Ing. *D. Flügge*, VEB KWO Berlin
Dr. rer. nat. *H. Wagner*, ZfW Dresden

An Modellkabelisolierungen wurde die elektrische Lebensdauer bei komplexer elektrischer und thermischer Belastung ermittelt. Die Lebensdauer von unvernetzten PE-Isolierungen ohne Additive verringert sich bei erhöhter Temperatur infolge thermischer Alterung des PE.
Bei chemisch vernetzten PE-Isolierungen mit Antioxidantien verändert sich die elektrische Lebensdauer im untersuchten Zeit- und Temperaturbereich von 3000 Std. und 130 °C nicht gegenüber der bei 20 °C. Dies wird mit der Doppelfunktion der Antioxidantien begründet. Sie verhindern einmal den thermooxidantiven Abbau des Polyethylens und wirken zum anderen gleichzeitig als elektrische Stabilisatoren.
Die mathematische Auswertung der auftretenden additiven Mischverteilungen der Durchschlagzeiten mittels der Maximum-Likelihood-Schätzung gestattet die Berechnung der Lebensdauerkennlinie für größere Beanspruchungszeiten.

M. Eberhardt, Dresden EK 4132

Zum Einfluß technologisch bedingter Fehlstellen auf die Impulsspannungsfestigkeit von PE-Kabeln [1]

Am PE-Mittelspannungskabel Typ NA2YCaY 1 × 185 re 6/10 kV wird der Einfluß definierter Fehlstellen im Bereich Leiter-Isolierung auf das Impulsspannungsverhalten untersucht. Die Nachbildung der Fehlstellen erfolgte durch vom Leiter ausgehende leitfähige Spitzen, die in ihrer Form und in ihren Abmessungen technologisch bedingte Unregelmäßigkeiten der Leiterglättungsschicht nachbilden.

Die Impulsspannungsuntersuchungen wurden im Spannungssteigerungs- und im Konstantspannungsversuch durchgeführt. Zu Vergleichszwecken erfolgten die Messungen sowohl an Prüflingen mit als auch ohne Fehlstellen.

Die Ergebnisse der Spannungssteigerungsversuche zeigen, daß an den fehlstellenbehafteten bzw. fehlstellenfreien Prüflingen eine übereinstimmende Polaritätsabhängigkeit der ermittelten Verteilungen vorliegt. Aufgrund dieser und weiterer, auch mikroskopischer Untersuchungen wurde geschlußfolgert, daß polaritätsabhängig unterschiedliche Durchschlagmechanismen wirken. Auf Grundlage der ermittelten Verteilungen wurden mögliche Ursachen der polaritätsabhängigen Streuungen diskutiert.

Die im Konstantspannungsversuch bei positiver Impulspolarität an Prüflingen mit Fehlstellen ermittelten Verteilungen zeigen, daß unabhängig von der Spannungsebene im untersuchten Bereich, der gleiche Alterungsmechanismus wirkte.

Die ermittelte Lebensdauerkurve war durch eine Gerade mit dem Lebensdauerexponenten $n = 17$ approximierbar.

L. Kott, Berlin EK 4123

REZENSIONEN

Diskrete Optimierungsmodelle

Von *K. Richter; P. Bachmann; S. Dempe*. Berlin: Verlag Technik 1988. 1. Auflage, 188 Seiten, 41 Bilder, 26,00 M.

Die Autoren des Buches wollten nicht die ganze Vielfalt diskreter Optimierungsmodelle umreißen. Es geht um ausgewählte Probleme, um ihre Modellierung und mögliche Lösungsalgorithmen. Hier werden bewährte Techniken herangezogen und neue Ansätze der Autoren popularisiert. Der Leser sollte über eine ingenieurspezifische mathematische Grundausbildung verfügen. Graphen- und mengentheoretische Hilfsmittel und Zugänge werden im Abschnitt 2 vermittelt. Fragen der Kompliziertheit von Algorithmen und der Komplexität werden im Abschnitt 3 bzw. 7 berührt. Die Bedeutung heuristischer oder sogar exakt begründeter Näherungsverfahren in den Fällen, in denen exakte Lösungen unrealistisch oder unmöglich sind, wird im Abschnitt 4 sichtbar. Verschiedene „effektive" oder „effektivste" Algorithmen werden in den Abschnitten 5 und 6 aus der Sicht der Algorithmen und in den Abschnitten 8 bis 10 aus einer Problemsicht behandelt. Das alles vollzieht sich an gut ausgewählten Beispielen.

W. Warmuth, Berlin EK 4078

SPS — Aufbau und Programmierung

Von *A. Auer*. Heidelberg: Hüthig Buch Verlag 1989. 2. überarbeitete Auflage, 150 Seiten, kart., DM 29,80

Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) gewinnen in der Automatisierungstechnik zunehmend an Bedeutung. Anliegen des Buches ist es mit dazu beizutragen, diese neue Technik einem breiteren Anwenderkreis zugänglich zu machen.
Nach einem einleitenden Kapitel werden im Kapitel 2 die technischen Realisierungen von Steuerungen in Form von VPS (verbindungsprogrammierte Steuerung) und SPS gegenüber gestellt.
Im Kapitel 3 werden die gebräuchlichen Beschreibungsmittel für binäre Steuerungen an einfachen Beispielen erläutert.
Das Kapitel 4 befaßt sich mit der prinzipiellen Wirkungsweise von SPS.

Das umfangreiche Kapitel 5 ist der Programmierung von SPS gewidmet. Zunächst werden die verknüpfungsorientierten Fachsprachen Anweisungsliste (AWL), Kontaktplan (KOP) und Funktions- bzw. Logikplan (FUP) nach DIN 40719 beschrieben. Dann wird auf der Basis von DIN 19237 der Begriff der Ablaufsteuerung definiert und an einfachen Beispielen erläutert. Es wird aufgezeigt, wie sich Ablaufsteuerungen mit den bereits behandelten Mitteln AWL und FUP darstellen lassen. Schließlich wird die ablauforientierte Fachsprache GRAFCET vorgestellt, die an das Petri-Netz-Konzept angelehnt ist und der IEC-Empfehlung SC 65A/WG6 entspricht.

Das ebenfalls umfangreiche Kapitel 6 behandelt in allgemeiner Form den gerätetechnischen Aufbau von SPS-Einrichtungen (Programmier- und Steuergeräte).

In dem sehr kurzen Kapitel 7 wird global auf die Problematik Zuverlässigkeit und Sicherheit in der Steuerungstechnik hingewiesen.

Im Kapitel 8 wird die SPS in Zusammenhang gebracht mit anderen Aufgaben der Automatisierungstechnik, wie z.B. Regeln, Überwachen und Prozeßleiten.

Die Kapitel 9 und 10 enthalten jeweils eine Zusammenstellung wichtiger Normen bzw. Begriffe der Steuerungstechnik.

Das Buch wendet sich in erster Linie an Facharbeiter und Ingenieure, die sich in die Problematik der SPS einarbeiten wollen. Es werden die für den Praktiker wesentlichen Aspekte der Realisierung von Steuerungen mit SPS-Einrichtungen umrissen. Das Darstellungsniveau ist so gehalten, daß für das Lesen keine theoretischen Kenntnisse auf dem Gebiet der Schaltalgebra, Automaten- und Netztheorie vorausgesetzt werden müssen. Derartige Aspekte sind nicht Gegenstand des Buches, was auch durch das ansonsten recht aktuelle Literaturverzeichnis zum Ausdruck kommt.

Das Buch kann Praktikern auf dem Gebiet der Automatisierungstechnik und Studenten einschlägiger Fachrichtungen als Einarbeitshilfe empfohlen werden.

Es regt darüber hinaus sicher auch zu tiefergehenden Studien an.

H. J. Zander, Dresden EK 4124

Kabel und Leitungen Aufbauelemente, Werkstoffe, Fertigung

Hrsg.: Autorenkollektiv (KWO); Berlin: VEB Verlag Technik 1989. 368 S., 313 Abb., 83 Tab.

Mit diesem Fachbuch liegt ein Nachfolgetitel des 1976 erschienenen Lehrbuches für die Berufsbildung „Kabel- und Leitungsfertigung" vor. Der Weiterentwicklung der Kabeltechnik wurde durch eine Neubearbeitung Rechnung getragen.

Das vorliegende Buch ist in erster Linie für die Ausbildung qualifizierter Facharbeiter der Kabelindustrie gedacht, wird aber auch den mit der Kabeltechnik Vertrauten als Nachschlagewerk gute Dienste leisten.

Die Verfasser des Buches waren insgesamt bemüht, in anschaulicher Form deutlich zu machen, daß weiterentwickelte Werkstoffe, wie vernetztes Polyethylen und neue Elastomere mit verbesserten Gebrauchseigenschaften, oder die Entwicklung und Einführung der LWL-Kabel neue Verfahrenstechnologien und Prüfmethoden erfordern und zur ständigen Erneuerung des Erzeugnissortiments führen. Nach einem Grundlagenabschnitt über Aufbau und Eigenschaften von Kabeln und Leitungen, in dem eine Übersicht über die Haupterzeugnisse der Kabelindustrie, der Standards und Erzeugnisbezeichnungen, der Aufbauelemente der Kabel, Leitungen und Wickeldrähte, des Erzeugnissortiments und der Übertragungseigenschaften gegeben wird, erfolgt in weiteren Kapiteln eine kurze Darstellung der in der Kabelindustrie verwendeten Werkstoffe von den Metallen, Plasten und Elasten, Kabelpapieren und Kabelisolierölen, Korrosionsschutz- und Vergußmassen, Faserstoffen, Elektroisolierlacken bis hin zum Glas als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Lichtwellenleitern. Ein umfangreiches Kapitel behandelt die Technologie der Kabel- und Leitungsfertigung. Hier werden anschaulich die vielfältigen Fertigungsprobleme der Kabelindustrie zusammengefaßt. Neben der Darstellung der konventionellen Kabeltechnologien, wie Drahtherstellung, Plast- und Elastaufbereitung, Verseilen und Isolieren, der Herstellung von Kabelmänteln, Schutzhüllen und der Bewehrung wird der Herstellung von Lichtwellenleiterkabeln ein allerdings sehr bescheidener Abschnitt gewidmet.

Hinweise auf verschiedene Prüfverfahren zeigen, daß das Prüfen im technologischen Prozeß ein Bestandteil der Gesamttechnologie ist und dazu beiträgt, stabile und stets reproduzierbare Fertigungsergebnisse zu sichern.

R. Grundig, Berlin EK 4121

Elektrische Straßenfahrzeuge

Von *D. Naunin* und 8 Mitautoren. Ehningen bei Böblingen: expert verlag 1989. 208 Seiten, DM 66,—

Die Autoren legen mit diesem Buch die Niederschrift eines Symposiums „Elektrische Straßenfahrzeuge" an der Technischen Akademie Esslingen vor. Stand und Entwicklungsperspektive elektrischer Straßenfahrzeuge in der BRD werden aus unterschiedlicher Sicht von Spezialisten ausführlich erläutert. Die Hauptabschnitte behandeln:

- wirtschaftliche und verkehrspolitische Aspekte für den Einsatz elektrischer Straßenfahrzeuge
- Erwartungen an die Batterie von elektrischen Straßenfahrzeugen in verschiedenen Einsatzgebieten
- die Bleibatterie, Verbesserung der Wirtschaftlichkeit durch periphere Maßnahmen
- neue Batteriesysteme
- Gleich- und Drehstromantriebe in elektrischen Straßenfahrzeugen
- Elektro-Hybridantriebe für Straßenfahrzeuge
- Elektrofahrzeuge aus der Sicht des Herstellers und des Marktes
- Elektrische Straßenfahrzeuge im praktischen Einsatz in der Schweiz
- Anwendungschancen für elektrische Straßenfahrzeuge heute und morgen
- Ausblick

Es wird herausgearbeitet und im Detail begründet, daß elektrische Straßenfahrzeuge nicht für universelle Anwendung, jedoch für spezielle Aufgaben, insbesondere im innerstädtischen Bereich durchaus ihre Anwendungschance haben. Der Batterieentwicklung als dem Hauptproblem wird viel Aufmerksamkeit geschenkt, ebenso den ökonomischen Fragen. Das Buch ermöglicht es, Entwicklungschancen des Elektroautos auch für die DDR abzuschätzen. Der Einsatz für innerstädtische Versorgungsaufgaben würde zu einer Minderung der Umweltbelastung in unseren Städten beitragen.

R. Schönfeld, Dresden EK 4119

WordPerfect 5.0

Von *H. Göckel*. Heidelberg: Hüthig Buch Verlag 1989. 2. überarbeitete Auflage, 818 S., zahlr. Abb., geb. DM 78,—

Das Textbe- und -verarbeitungsprogramm WordPerfect erfreut sich zunehmender Beliebtheit und gehört vor allem im deutschsprachigen Raum zu den am meisten verkauften Softwareprodukten.

Für Nachschlagewerke, als Ergänzung zum WordPerfect-Handbuch, entstand ein außerordentlich großer Bedarf. Diesem Umstand trägt der Hüthig Buch Verlag GmbH mit der zweiten Auflage des Standardwerkes von *Göckel* Rechnung.

Die erste Auflage wurde geringfügig überarbeitet, teilweise ergänzt und partiell vorhandene Fehler korrigiert.

Eine Ergänzung wurde u.a. vorgenommen im Kapitel 5.1.6. zur Erläuterung der sogenannten Page Preview Funktionen, im Abschnitt 20.5.2. zur Beschreibung der in Macrobefehlen verwendbaren Formeln, und schließlich wurde das Glossar erweitert um den Abschnitt 28.32 (Return-Zeilenschaltung).

Neben einigen wenigen Dopplungs- oder Verwechslungsfehlern, die gegenüber der ersten Ausgabe korrigiert wurden, erfolgte die Richtigstellung eines zu falschen Ergebnissen führenden Hinweises zur automatischen Indexierung von zusammengehörigen Texten aus mehreren Dateien. Insgesamt stellt dieses Buch, wie auch sein Vorgänger, eine wertvolle Hilfe sowohl für den Anfänger als auch für den „Profi" dar.

U. Müller, Berlin EK 4102

VORSCHAU

Im Heft 5/90 erscheinen unter anderem:

Baggenstos, H.; Leuchtmann, P.: Numerische Berechnung elektromagnetischer Felder mittels MMP-Programmen

Müller, M.: Berechnung des elektrischen Strömungsfeldes zur Projektierung von Anodenfeldern für den katodischen Korrosionschutz in vermaschten Netzen

Junghans, H.: Anwendung klassischer Methoden der Feldtheorie für eine erste Bewertung feldverzerrender Einflußfaktoren des elektrischen Feldes

Die Redaktion

Lemke, E.; Weißenberg, W.; Hornschuh, M.; Flügge, D.: Krieger, D.; Friese, G.; Siebert, K.

New Diagnosis Method Adapted to Dielectrically Testing at Locus of PE/VPE-Medium-Voltage Cables

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, pp. 124–126, 3 Figs., 11 Refs.

In connection with fundamental investigations as well as on base of practical measurements at locus a new diagnostic highvoltage testing method is recommended, adapted to layed PE/VPE-cables. Preliminary parameters are given, which surely have to be made more precisely after having further practical experiences.

Flügge, D.; Röhr, L.

Multi-Stress Load of Cables under the Influence of Energized Radiation

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, pp. 126–130, 11 Figs., 3 Tables, 19 Refs.

Starting from the loades, appearing in the KKW (nuclear power station), the interaction of individual influencing factors, such as radiation, temperature and electric field strength, to the material properties is studied by examples (multi-stress load).

Eberhardt, M.; Li, C. S.

Electric Life of Polyethylen Cable Insulation during Operating Temperature

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, pp. 131–132, 6 Figs., 2 Equations, 3 Refs.

By means of cable insulation models, existing of polyethylen with countersunk point electrodes, the electric life during simultaneous thermal load was determined. The studies were made with non-interlaced polyethylen.

Scharff, C.; Eberhardt, M.

Behaviour of Interlacer Fission Products in VPE-Cable Insulations during Operating Temperature

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, pp. 133, 2 Figs., 5 Refs.

During chemically interlacing polyethylen cable insulations so-called interlacer fission products occur, which are effective as electric stabilizers. Lodging 10 kV VPE power cables for more than 4000 hours at 90 °C and thereafter determining the channel using time by the needle test at 20 °C show, that the interlacer fission products are diffusing out and, therefore, they are not able to contribute to extending the electric life of PE-cables.

Scharff, C.; Eberhardt, M.

Effect of Cyclic-Thermal Load of more than 130 °C to the VPE-Cable Insulation

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, pp. 134–135, 3 Figs., 1 Table, 3 Refs.

Chemically interlaces 10 kV PE-cables were loaded cyclic-thermally more than 1000 hours up to 130 °C. Thereafter the effect on the electric long-time behaviour, on the thermo-oxidative damage of the VPE, as well as deformations of the cabel insulation were studied.

Hornschuh, M.; Lemke, E.

Use of the TE-Probe Measurement Techniques within the Quality Control at PE/VPE-Medium-Voltage Cables

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, pp. 135–138, 6 Figs., 2 Tables, 2 Equations, 9 Refs.

Several application possibilities of a partial discharge measuring probe of the type M 4202 (TE-probe) in the quality control of PE/VPE-cables were studied. The results point out, that the TE-measuring probe may substitute the conventional TE-measuring device in the standard measuring circuit under predetermined conditions. Furthermore possibilities are represented, how by using the TE-probe out of the standard measuring circuit sensitive TE-measurements at cables may be realized.

Jegust, D.

Computing the Electric Field Strength in Cable Coupling Sleeves and Cable Closures by Means of PC

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, pp. 139–140, 6 Figs., 3 Refs.

A programme Packet of computing and designing electrode arrangements of field-controlling areas in cable sets by means of a personal computer is represented. By using that a high decrease of the developing time is reachable.

Mosch, W.; Dietrich, M.

Aspects Related to High-Voltage-Techniques in Using Weakly Inhomogeneous Electric Fields

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, pp. 141–145, 14 Figs., 2 Tables, 23 Refs.

Extensively independent of both the insulating material and the electrode arrangement it may be proved, that point imperfections, technologically conditioned, and others, such as thermal disturbing influences, may reduce the more engravingly the electric strength, the higher the electric strength of the insulating material will be under ideal conditions (technically not realizable).

Kahle, M.; Porzel, R.; Knilpfer, B.; Neudert, E.

Fundamentals for Alternative High-Voltage Testing Methods for Cables with Extruded Plastic Insulations

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, pp. 146–150, 11 Figs., 6 Refs.

An ingenious substitution of conventional TE-measurements and a purposeful addition of the infra-frequency testing and analyzing processes may be seen in the computer aided partial discharge diagnosis of the cable under operating conditions.

Laage, U.; Röhr, L.

Watertreeing in PE/VPE-Medium-Voltage Cables

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, pp. 151–153, 6 Figs., 1 Table, 17 Refs.

The first medium-voltage PE/VPE-cables, supplied by the Kombinat Kabelwerk Oberspree (KWO), have absolved, now, about 50 % of the rated using time of 50 years. Corresponding to the laboratory testing results the practical operating experiences are offering no tendencies of restricting the reliability or the life, caused by watertreeing.

Heidmann, G.

New High-Temperature Supre-Conductors May be Interesting to the Electric Power Engineering

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, pp. 154–155, 1 Fig., 4 Refs.

In spite of multiple advantageous prototype solutions, especially also of supra-conducting electric power cables, hitherto an introduction into the manufacture of supra-conducting products in the area of the electric power engineering has not been made anywhere. Therefore it must be cleared, if adapted conductors of a high conductivity of currents, cooled with liquid nitrogen, can be produced with good processing properties and reachable mechanic load capacity.

Лемке, Э.; Вайсенберг, В.; Хорншу, М.; Флюгге, Д.; Кригер, Д.; Фризе, Г.; Зиберт, К.

Новый способ диагнозирования для диэлектрического испытания на месте прокладки кабелей среднего напряжения с полиэтиленовой и сшиваемой полиэтиленовой изоляцией

ELEKTRIE, Берлин, 44 (1990) 4, стр. 124–126, 5 рис., 11 лит.

Предлагается новый способ диагностического высоковольтного испытания проложенных кабелей с полиэтиленовой и сшиваемой полиэтиленовой изоляцией, разработанный в рамках научных исследований и на базе практических измерений на месте прокладки кабелей.

Флюгге, Д.; Рер, Л.

Многострессовая нагрузка кабелей под влиянием излучения большой энергии

ELEKTRIE, Берлин 44 (1990) 4, стр. 126–130, 11 рис., 5 табл., 19 лит.

Исходя из нагрузок, имеющих место в атомных электростанциях, исследуется на конкретных примерах взаимодействие отдельных влияющих факторов, таких как излучение, температура и электрическая напряженность поля, и их влияние на свойства материалов (многострессовая нагрузка).

Эберхардт, М.; Ли, Ц. С.

Электрическая долговечность полиэтиленовых изоляций кабелей при рабочей температуре

ELEKTRIE, Берлин 44 (1990) 4, стр. 131–132, 6 рис., 2 уравн., 3 лит.

На модельных кабельных изоляциях из полиэтилена с погруженными игольчатыми электродами определилась электрическая долговечность при одновременной термической нагрузке.

Шарфф, К.; Эберхардт, М.

Поведение продуктов деления от сшивания в сшиваемых полиэтиленовых кабельных изоляциях при рабочей температуре

ELEKTRIE, Берлин 44 (1990) 4, стр. 133, 2 рис., 5 лит.

Содержание в течение 4000 часов сильноточных кабелей 10 кВ с сшиваемой полиэтиленовой изоляцией при температуре 90 °С с последующим определением времени образования канала частичного разряда путем проведения измерения с игольчатым электродом при температуре 20 °С показывает, что продукты деления от сшивания по истечению определенного времени выделяются диффундированием и поэтому не могут содействовать удлинению электрической долговечности кабелей с полиэтиленовой изоляцией.

Шарфф, К.; Эберхардт, М.

Воздействие циклической термической нагрузки свыше 130 °С на сшиваемую полиетиленовую кабельную изоляцию

ELEKTRIE, Берлин 44 (1990) 4, стр. 134–135, 3 рис., 1 табл., 3 лит.

Химически сшиваемые полиетиленовые изоляции кабелей на 10 кВ подвергались циклической нагрузке при температуре до 130 °С. После этого исследовались воздействия на электрическую характеристику через длительное время, на возникновение термоокислительных повреждений полиетилена.

Хорншу, М.; Лемке, Э.

Применение техники измерения частичных разрядов при помощи зонд в рамках проверки качества полиэтиленовой и сшиваемой полиэтиленовойи золяции кабелей среднего напряжения

ELEKTRIE, Берлин 44 (1990) 4, стр. 135–138, 6 рис., 2 табл., 2 уравн., 9 лит.

Исследовались разные возможности применения измерительного зонда частичных разрядов М 4202 при проведении проверки качества полиэтиленовой и сшиваемой полиэтиленовой изоляции кабелей. Результаты показывают, что при соблюдении определенных условий измерительный зонд частичных разрядов в стандартном измерительном контуре может заменять традиционный измерительный прибор частичных разрядов.

Йегуст, Д.

Расчет при помощи персонального компьютера электрической напряженности поля в кабельных соединительных и концевых муфтах

ELEKTRIE, Берлин 44 (1990) 4, стр. 139–140, 6 рис., 3 лит.

Представляется пакет программ для расчета и конструирования при помощи персонального компьютера электродных схем для управляющих полем диапазонов в кабельных арматурах.

Мош, В.; Дитрих, М.

Аспекты техники высоких напряжений при применении слабо-неоднородных электрических полей

ELEKTRIE, Берлин 44 (1990) 4, стр. 141–145, 14 рис., 2 табл., 23 лит.

В большой мере независимо от изоляционного материала и электродной схемы можно доказывать, что технологически обусловленные неисправности и другие, например, термические мешающие влияния снижают электрическую прочность тем более существенно, чем выше является электрическая прочность изоляционного материала в идеальных (технически не реализуемых) условиях.

Кале, М.; Порцель, Р.; Кнюпфер, Б.; Нойдерт, Э.

Основы альтернативных приемов высоковольтных испытаний для кабелей с экструдированной пластмассовой изоляцией

ELEKTRIE, Берлин 44 (1990) 4, стр. 146–150, 11 рис., 6 лит.

Как отвечающее смыслу замещение традиционных измерений частичных разрядов и целесообразное дополнение инфрачастотных процессов испытания и анализа рассматривается автоматизированное при помощи ЭВМ диагнозирование частичных разрядов кабеля в рабочих условиях.

Лааге, У.; Рер, Л.

Древообразные каналы частичных разрядов (Watertreeing) на кабелях среднего напряжения с полиэтиленовой и сшиваемой полиэтиленовой изоляцией

ELEKTRIE, Берлин 44 (1990) 4, стр. 151–153, 6 рис., 1 табл., 17. лит.

В соответствии с результатами лабораторных испытаний, практический опыт эксплуации не показывает никаких тенденций к ограничению надежности или долговечности за счет древообразных каналов частичных разрядов (Watertreeing).

Хайдманн, Г.

Новые высокотемпературные сверхпроводники могут приобретать интерес для сильноточной техники

ELEKTRIE, Берлин 44 (1990) 4, стр. 154–155, 1 рис., 4 лит.

Несмотря на многие успешные решения прототипов, в частности и сверхпроводящих сильноточных кабелей, до сих пор нигде в области сильноточной техники не внедрены в производство сверхпроводящие изделия.

Lemke, E.; Weißenberg, W.; Hornschuh, M.; Flügge, D.; Krieger, D.; Friese, G.; Siebert, K.

Neues Diagnoseverfahren zur dielektrischen Vor-Ort-Prüfung von PE/VPE-Mittelspannungskabeln

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, S. 124–126, 3 Bilder, 11 Lit.

Im Rahmen von Grundlagenuntersuchungen sowie auf der Basis praktischer Vor-Ort-Messungen wird ein neuartiges diagnostisches Hochspannungs-Prüfverfahren für verlegte PE/VPE-Kabel empfohlen. Vorläufige Parameter werden angegeben, die nach weiteren praktischen Erfahrungen sicherlich noch zu präzisieren sind.

Flügge, D.; Röhr, L.

Multistreßbeanspruchung bei Kabeln unter Einfluß energiereicher Strahlung

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, S. 126–130, 11 Bilder, 3 Tafeln, 19 Lit.

Ausgehend von den in KKW auftretenden Beanspruchungen wird das Zusammenwirken einzelner Einflußfaktoren, wie Strahlung, Temperatur und elektrische Feldstärke, auf die Materialeigenschaften (Multistreßbeanspruchung) anhand von Beispielen untersucht.

Eberhardt, M.; Li, C. S.

Elektrische Lebensdauer von Polyethylen-Kabelisolierungen bei Betriebstemperatur

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, S. 131–132, 6 Bilder, 2 Gln., 3 Lit.

An Modellkabelisolierungen aus Polyethylen mit eingesenkten Spitzenelektroden wurde die elektrische Lebensdauer bei gleichzeitiger thermischer Belastung ermittelt. Die Untersuchungen erfolgten an unvernetztem Polyethylen und an chemisch vernetztem Polyethylen.

Scharff, C.; Eberhardt, M.

Verhalten von Vernetzerspaltprodukten in VPE-Kabelisolierungen bei Betriebstemperatur

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, S. 133, 2 Bilder, 5 Lit.

Bei der chemischen Vernetzung von Polyethylen-Kabelisolierungen entstehen sog. Vernetzerspaltprodukte, die als elektrische Stabilisatoren wirken. Lagerungen von 10-kV-VPE-Starkstromkabeln über 4000 Stunden bei 90 °C und anschließende Ermittlung der Kanaleinsatzzeit im Nadeltest bei 20 °C zeigen, daß die Vernetzerspaltprodukte nach einer bestimmten Zeit ausdiffundieren und deshalb nicht zur Verlängerung der elektrischen Lebensdauer von PE-Kabeln beitragen können.

Scharff, C.; Eberhardt, M.

Wirkung zyklisch-thermischer Belastung über 130 °C auf die VPE-Kabelisolierung

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, S. 134–135, 3 Bilder, 1 Tafel, 3 Lit.

Chemisch vernetzte 10-kV-PE-Kabel wurden über 1000 Stunden bis 130 °C zyklisch-thermisch belastet. Danach wurde die Auswirkung auf das elektrische Langzeitverhalten, auf die thermooxidative Schädigung des VPE sowie Verformungen der Kabelisolierungen untersucht.

Hornschuh, M.; Lemke, E.

Anwendung der TE-Sondenmeßtechnik im Rahmen der Qualitätskontrolle an PE/VPE-Mittelspannungskabeln

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, S. 135–138, 6 Bilder, 2 Tafel, 2 Gln., 9 Lit.

Verschiedene Einsatzmöglichkeiten einer Teilentladungsmeßsonde M 4202 bei der Qualitätskontrolle von PE/VPE-Kabeln wurden untersucht. Die Ergebnisse zeigen, daß die TE-Meßsonde das konventionelle TE-Meßgerät im Standardmeßkreis unter bestimmten Bedingungen ersetzen kann. Darüber hinaus werden Möglichkeiten vorgestellt, wie mit der TE-Sonde außerhalb des Standardmeßkreises empfindliche TE-Messungen am Kabel realisierbar sind.

Jegust, D.

Berechnung der elektrischen Feldstärke in Kabelverbindungsmuffen und Kabelverschlüssen mittels PC

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, S. 139–140, 6 Bilder, 3 Lit.

Vorgestellt wird ein Programmpaket zur Berechnung und Konstruktion von Elektrodenanordnungen für feldsteuernde Bereiche in Kabelgarnituren mit Hilfe eines Personalcomputers. Durch die Anwendung wird eine hohe Entwicklungszeiteinsparung erreicht.

Mosch, W.; Dietrich, M.

Hochspannungstechnische Gesichtspunkte bei der Anwendung schwach-inhomogener elektrischer Felder

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, S. 141–145, 14 Bilder, 2 Tafeln, 23 Lit.

Weitgehend unabhängig vom Isolierstoff und der Elektrodenanordnung kann nachgewiesen werden, daß technologisch bedingte Störstellen und andere, z. B. thermische Störbeeinflussungen umso gravierender die elektrische Festigkeit reduzieren, je höher die elektrische Festigkeit des Isolierstoffes unter idealen (technisch nicht realisierbaren) Bedingungen ist.

Kahle, M.; Porzel, R.; Knilpfer, B.; Neudert, E.

Grundlagen für alternative Hochspannungsprüftechniken für Kabel mit extrudierter Kunststoffisolierung

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, S. 146–150, 11 Bilder, 6 Lit.

Eine sinnvolle Substitution herkömmlicher TE-Messungen und eine zweckmäßige Ergänzung der Infrafrequenzprüf- und analyseprozesse wird in der computergestützten Teilentladungsdiagnose des Kabels unter Betriebsbedingungen gesehen.

Luage, U.; Röhr, L.

Watertreeing bei PE/VPE-Mittelspannungskabeln

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, S. 151–153, 6 Bilder, 1 Tafel, 17 Lit.

Die ersten vom Kombinat Kabelwerk Oberspree (KWO) gelieferten Mittelspannungs-PE/VPE-Kabel haben jetzt 50 % der Nenn-Nutzungsdauer von 50 Jahren absolviert. In übereinstimmung mit den Laborprüfergebnissen zeigen die praktischen Betriebserfahrungen keine Tendenzen zur Einschränkung der Zuverlässigkeit oder der Lebensdauer durch Watertreeing.

Heidmann, G.

Neue Hochtemperatur-Supraleiter können für die Starkstromtechnik interessant werden

ELEKTRIE, Berlin 44 (1990) 4, S. 154–155, 1 Bild, 4 Lit.

Trotz vielfach erfolgreicher Prototyplösungen insbesondere auch von supraleitenden Starkstromkabeln hat eine Produktionseinführung von supraleitenden Erzeugnissen im Bereich der Starkstromtechnik bisher nirgend stattgefunden. Es bleibt daher noch zu klären, ob geeignete, mit flüssigem Stickstoff gekühlte Leiter hoher Stromtragfähigkeit mit guten Verarbeitungseigenschaften und ausreichender mechanischer Belastbarkeit herstellbar sind.

Herausgeber	Kammer der Technik, Fachverband Elektrotechnik
Verlag	Verlag Technik DDR-1020 Berlin, Oranienburger Str. 13/14 Telegrammadresse: Technikverlag Berlin Telefon: 28700; Telex: 0112228 techn. dd
Verlagsdirektor	Dipl.-Ing. *Klaus Hieronimus*
Redaktion	Dr.-Ing. *Klaus Heide*, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 2870345)
Lizenz-Nr.	1100 des Presse- und Informationsdienstes der Regierung der DDR
Gesamtherstellung	III/18-328 Messedruck Leipzig, BT Borsdorf 7122 Borsdorf
Gestaltung	*Ursula Maria Lange*
Anzeigenannahme	Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigen-Annahmenstellen in der DDR, für DDR-Wirtschaftsanzeigen (Anzeigenpreisliste Nr. 8) sowie für Auslandsanzeigen (Mediadaten auf Aufforderung) Verlag Technik, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201, Berlin, 1020.
Erfüllungsort und Gerichtsstand	Berlin-Mitte. Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig.
AN (EDV)	6730
Erscheinungsweise	monatlich 1 Heft
Heftpreis	2,50 M, Abonnementpreis vierteljährlich 7,50 M. Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebes BUCHEXPORT zu entnehmen.
Bezugsmöglichkeiten DDR	sämtliche Postämter
SVR Albanien	Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propaganditit te Librit Rruga Konference e Pezes, Tirana
VR Bulgarien	Direkzia R. E. P., 11a, Rue Paris, Sofia
VR China	China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P. O. Box 88 Beijing
ČSSR	PNS – Ústřédni Expedicia a Dovoz Tisku Praha, Slezská 11, 120000 Praha 2 PNS, Ústredna Expedicia a Dovoz Tlače Praha, Posta 022, 88547 Bratislava
SFR Jugoslawien	Jugoslovenska Knijiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarsko Produzéće MLADOST, Ilica 30, Zagreb
Koreanische DVR	CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation, Pyongyang
Republik Kuba	Empresa de Comercio, Exterior de Publicationes, O'Reilly No. 407, Cuidad Habana
Republik Polen	C. K. P. i. W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa
Rumänien	D. E. P. Bucaresti Piata Scinteii, Bucaresti
UdSSR	Städtische Abteilungen von Sojuzpečat' oder Postämter und Postkontore
Republik Ungarn	P. K. H. I., Külföldi Elöfizetési Osztály, P. O. Box 16, 1426 Budapest
SR Vietnam	XUNHASABA 32, Hai Ba Trung, Ha Noi
BRD und Berlin (West)	ESKABE Kommissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141–167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH+ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30
Österreich	Helios Literatur-Vertriebs-GmbH & Co. KG, Industriestraße B 13, Brunn am Gebirge
Schweiz	Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstr. 109, 8033 Zürich
Alle anderen Länder	örtlicher Fachbuchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, DDR-7010 Leipzig, Postfach 160; und Leipzig Book Service, DDR-7010 Leipzig, Talstraße 29

Rostock-Überseehafen

KWO-
Kabel in alle Welt

KWO

ISSN 0013—5399
ELEKTRIE · Berlin 44 (1990) 4 · S. 121—

6730 4 177 027 465
8612 7001 0136 KOMB KERAM WERKE
PF 1

KWO

Kombinat
VEB KABELWERK OBERSPREE (KWO)
"Wilhelm Pieck"
Wilhelminenhofstr. 76/77
DDR - Berlin
1160

Die richtigen Kabel für Sie!

Für alle Anwendungsgebiete.
Nach Ihren speziellen Wünschen.
Nach internationalen Standards.
Approbationen liegen vor.
Wir bieten jahrzehntelange Erfahrungen, technisches Know-how, beraten Sie bei der Lösung Ihrer Anwenderprobleme, vergeben Lizenzen.
Wir übernehmen Projektierung, Lieferung und Chefmontage kompletter Kabelanlagen,
Unterweisung der Anwendermonteure sowie Ausbildung Ihrer Arbeitskräfte für die Montage und Instandhaltung kabeltechnischer Anlagen.

KWO
weltweit kontaktbereit

Wir sind auf allen wichtigen internationalen Messen und Fachausstellungen vertreten.
Zu den Leipziger Messen erreichen Sie uns in Halle 18 bzw. Halle 22.

EXPORTEUR:

Elektrotechnik
EXPORT-IMPORT
VOLKSEIGENER AUSSENHANDELSBETRIEB
DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK
HAUS DER ELEKTROINDUSTRIE
ALEXANDERPLATZ 6, BERLIN, DDR - 1026
TELEFON 21 80 - TELEX 115061